



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES,
FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL**

TRABAJO FIN DE GRADO

**APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS
DE BIOINGENIERÍA EN ACTUACIONES DE RESTAURACIÓN
FLUVIAL**

ÁLVARO MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

SEPTIEMBRE 2015

TUTORES:

Dña. CAROLINA MARTÍNEZ SANTA-MARÍA

D. ENRIQUE SADORNIL ARENAS





***Aplicación informática para la selección de técnicas de bioingeniería en actuaciones de
restauración fluvial***

Autor:

Álvaro Martínez Fernández

Directores:

Dña. Carolina Martínez Santa-María

D. Enrique Sadornil Arenas

Septiembre 2015

GRADO EN INGENIERÍA DEL MEDIO NATURAL

© UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2015, Todos los derechos reservados



Agradecimientos

A mis tutores y co-tutores del proyecto, Carolina Martínez Santa-María, J. Anastasio Fernández Yuste, Enrique Sadornil Arenas y Alejandro Vivar Sanz, por orientarme y aconsejarme durante todo el proceso del presente proyecto.

A Fernando Magdaleno Mas, a Evelyn García y a Paola Sangalli, por la ayuda obtenida a la hora de la realización de la investigación.

Al Congreso RestauraRíos2015, por dejarme participar en la pre-selección y ayudarme a mejorar.

A mi familia y a mis compañeros, por hacerme más fácil el día a día.

Gracias.

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo confeccionar una herramienta informática que permita determinar, conocidos un conjunto de parámetros hidráulicos y geométricos, cuál es la técnica de bioingeniería más eficaz para la estabilización de taludes en el ámbito de la restauración de ríos. Con dicha herramienta se pretende recopilar, en una base de datos y a través de un estudio bibliográfico, las limitaciones que presentan cada técnica de bioingeniería en cuanto a velocidades del flujo, cortantes del flujo y pendientes de taludes además de otros factores como el campo de aplicación, la época de implantación o las especies vegetales recomendadas.

Asimismo, se pretende sistematizar los procesos de cálculo de los cortantes y velocidades en el lecho y en el talud del río de manera simplificada y a lo largo del perfil transversal de un tramo, que lleven a la toma de decisiones sobre la implantación de cada técnica según los datos aportados por diversos autores y estudios sobre este tema. La comparación de métodos de estimación de cortantes también se ha estudiado.

La aplicación que se va a diseñar en este estudio se va a realizar mediante Microsoft Office Excel, en la que habrá que introducir una serie de parámetros que se obtienen previamente mediante la aplicación informática HEC-RAS. Las variables de entrada para que la herramienta pueda funcionar son: velocidad del flujo, peso específico del agua con sedimentos, radio hidráulico, pendiente del cauce, anchura de la superficie libre, calado, radio de curvatura, pendiente del talud... Además la herramienta considera si el tramo está en curvatura. Como aliciente, se puede seleccionar la región ecológica en la que se va a realizar la actuación de restauración fluvial para comprobar las especies vegetales recomendadas.

Estas variables de entrada se comparan con una base de datos donde están establecidas las características limitantes de cada técnica. La investigación bibliográfica se ha llevado a cabo a través de artículos científicos, libros y manuales referentes a este tema, comunicación con expertos y proyectos de restauración fluvial, entre otros.

Una vez introducidas las variables necesarias, la aplicación nos dará como resultado las diversas técnicas de bioingeniería más favorables según la distribución de cortantes y velocidades a lo largo del perfil transversal de un tramo del río y teniendo en cuenta la pendiente del talud.

Este proyecto no deja de ser una investigación original y no realizada anteriormente, que deberá ir tomando forma y ampliándose con el tiempo, puesto que actualmente la información existente es escasa y poco estructurada del tema. Puede resultar una herramienta de apoyo bastante útil para aquellos profesionales que trabajan en el ámbito de la restauración de ríos.

Summary

This project aims to make a software tool that allows the user to determine, knowing a set of hydraulic and geometrical parameters, which is the most effective technique of bioengineering for the stabilization of slopes within the scope of the restoration of rivers. This said tool will be used in order to collect, in a database and through a literature review, the limitations that present each technique of bioengineering in terms of flow velocities, shear stresses and average gradient of the slopes as well as other factors such as the field of application, the time of implantation or the recommended plant species.

Furthermore, it will systematize the process of calculation of the shear stress and velocities in the bed and the slope of the river in a simplified way along the cross-section of a stretch, that lead to decisions on the implementation of each technique according to the data provided by different authors and studies on this subject. The comparison between the estimation methods of shear stress has also been studied.

The application being designed in this study will be performed using Microsoft Office Excel, which will have to introduce a series of parameters obtained previously using the HEC-RAS software. The input variables for the tool to function are: flow velocity, weight-specific water with sediments, radio hydraulic, slope of the runway, width of the free surface, depth, radius of curvature, the slope ... In addition the tool considers if the stretch is in curvature. As incentive, river restoration will be carried out in an eco-region in order to check the recommended plant species to be selected.

These input variables are compared with a database where the limiting characteristics of each technique are established. Bibliographic research is carried out through scientific articles, books and manuals relating to this subject and communication with experts in river restoration, amongst other projects.

Once introduced the necessary variables, the application will result in several more favorable bioengineering techniques according to the distribution of shear stresses and velocities along the cross-section of a stretch of the river and taking into account the slope of the sidewall.

This project never ceases to be original research, which will be taking shape and expanding over time, since currently existing information is scarce and there is little structure to the topic. A support tool useful for professionals who work in the field of the restoration of rivers.



Índice

1. Introducción	29
1.1. Formulación del problema	29
1.2. Objetivos	33
2. Esquema de trabajo	36
2.1. Fuentes de información consultadas	38
3. Base de datos de las técnicas de bioingeniería	42
3.1. Contenido de la base de datos para cada material o técnica de bioingeniería ..	42
3.2. Creación de la base de datos.....	44
3.3. Fichas técnicas para cada material o técnica de bioingeniería	45
4. Estimación de las solicitaciones del flujo	45
4.1. Elección de las secciones representativas	46
4.2. Estimación de la velocidad media del flujo	47
4.3. Estimación de la pendiente del talud	51
4.4. Estimación del cortante del flujo	52
4.4.1. Concepto y estimación del cortante medio del flujo en una sección	52
4.4.2. Efecto de los flujos secundarios	53
4.4.3. Efecto de la curvatura de un tramo fluvial.....	54
4.5. Adaptación de las metodologías de cálculo en canales a cauces naturales.....	55
4.5.1. Introducción	55
4.5.2. Problemas de la generalización de resultados a un cauce natural	57
4.5.3. Criterios para la generalización del resultado a cauces naturales.....	58
4.6. Revisión bibliográfica y selección de los métodos de estimación de los cortantes del flujo 60	
4.7. Aplicación de la metodología de estimación de los cortantes del flujo	63
4.7.1. Introducción	63
4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo.....	63
Método nº 1: Mays, 1999. Hydraulic Design Handbook.	64
Método nº 2: United States Department of Agricultura (USDA), 2007. Stream Restoration Design National Engineering Handbook.....	69
Método nº 3: Lane, E. W. 1952.	73



Método nº 4: Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). <i>Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel</i>	75
Método nº 5: T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). <i>Design of Roadside Channels with Flexible Linings</i>	78
4.7.3. Aplicación en tramos representativos	83
Tramo nº 1.....	83
Tramo nº 2.....	84
Tramo nº 3.....	85
Tramo nº 4.....	86
4.7.4. Aplicación y resultados.....	87
Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 1 “Spring creek”	88
Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 2 “Bear run”	100
Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 3 “Río Tajo”	111
Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 4 “Critical creek”	121
4.8. Selección final de la metodología de cálculo.....	131
5. Protocolo para la selección de técnicas de bioingeniería	132
5.1. Introducción	132
5.2. Paso previo: HEC-RAS.....	133
5.3. Secuencia de cálculos en Microsoft Excel	135
5.3.1. Entrada de variables.....	135
5.3.2. Cálculos realizados en la aplicación informática.....	137
5.3.3. Resultados obtenidos para la selección de técnicas de bioingeniería	139
5.4. Programación en Microsoft Excel	143
6. Aplicación práctica	144
6.1. Aplicación práctica a un tramo del río Urumea	145
6.1.1. Localización y caracterización general	145
6.1.2. Modelización hidráulica mediante el programa informático HEC-RAS.....	146
6.1.3. Cálculo de variables mediante Microsoft Excel.....	147
Sección 1 correspondiente al tramo de estudio del río Urumea	147
Sección 7 correspondiente al tramo de estudio del río Urumea	152
6.1.4. Resultados	156
La consulta en la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea.....	156



La consulta en la sección 7 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea.....	159
6.2. Aplicación práctica a un tramo del río Cañamares	162
6.2.1. Localización y caracterización general	162
6.2.2. Modelización hidráulica mediante el programa informático HEC-RAS.....	163
6.2.3. Cálculo de variables mediante Microsoft Excel.....	164
Sección 1 correspondiente al tramo de estudio del río Cañamares	165
Sección 4 correspondiente al tramo de estudio del río Cañamares	169
6.2.4. Resultados	173
La consulta en la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares.....	173
La consulta en la sección 4 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares.....	176
7. Conclusiones.....	179
8. Bibliografía	186
Anexo I: Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería	193
Anexo II: Especies vegetales recomendadas según la región ecológica	222
Anexo III: Programación de la macro de consulta para la aplicación informática	224



Índice de tablas

Tabla 1: Ejemplo de la estructura de la base de datos de la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.	44
Tabla 2: Tabla que muestra las consideraciones iniciales que se cumplen en cada uno de los métodos de estimación del cortante del flujo que han sido seleccionados previamente para el posterior estudio. Fuente: elaboración propia.....	62
Tabla 3: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 1. Fuente: elaboración propia.	97
Tabla 4: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en el lecho para la sección transversal seleccionada del tramo nº 1 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.	98
Tabla 5: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 2. Fuente: elaboración propia.	108
Tabla 6: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 2 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.	109
Tabla 7: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 3. Fuente: elaboración propia.	118
Tabla 8: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 3 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.	119
Tabla 9: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 4. Fuente: elaboración propia.	127
Tabla 10: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 4 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.	129



Tabla 11: Datos recogidos del geoportal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) acerca de la localización del río Urumea y su codificación. Fuente: elaboración propia.....	145
Tabla 12: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.....	149
Tabla 13: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia.	149
Tabla 14: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen en la sección 1 del tramo del río Urumea. Además, aparece la longitud de protección y la sobre-elevación adicional. Fuente: elaboración propia.....	150
Tabla 15: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.....	153
Tabla 16: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia.	154
Tabla 17: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen correspondientes a la sección 7 del tramo de estudio del río Urumea. Además, aparece la longitud de protección y la sobre-elevación adicional. Fuente: elaboración propia.	154
Tabla 18: Datos recogidos del geoportal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) acerca de la localización del río Cañamares y su codificación. Fuente: elaboración propia.....	162
Tabla 19: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.....	166
Tabla 20: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia. .	167



Tabla 21: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia. 167

Tabla 22: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia..... 170

Tabla 23: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 4 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia. . 171

Tabla 24: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia. 171



Índice de figuras

Figura 1: Técnica de ingeniería naturalística. Trenzado vivo. Fuente: <i>Aquanea</i> , 2014. .	30
Figura 2: Técnica de ingeniería biofísica. Fiber Roll TM. Fuente: <i>Aquanea</i> , 2014.	30
Figura 3: Técnica de ingeniería estructural vegetal. Gavión flexible. Fuente: <i>Aquanea</i> , 2014.	31
Figura 4: Diagrama de flujo ilustrativo compuesto por tres fases que resumen el proyecto. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5: Diagrama de flujo que resume el proyecto con mayor grado de detalle. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 6: Ejemplo de un tramo fluvial con indicación de secciones transversales representativas. Fuente: Comunidad ISM, 2015.	46
Figura 7: Ejemplo de la distribución de la velocidad en un cauce natural y en un canal rectangular a través de líneas de igual velocidad o isotacas. Fuente: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Cátedra de Ingeniería Rural, 2015.	47
Figura 8: Representación gráfica de un ejemplo de las subsecciones para la estimación de la velocidad media en la sección. Fuente: Apuntes HF, UPM, 2013.	48
Figura 9: Ejemplo de la distribución de la velocidad del flujo a lo largo de una sección transversal. Fuente: HEC-RAS.	49
Figura 10: Ventana correspondiente al comando “Steady Flow Analysis”. Fuente: HEC-RAS.	50
Figura 11: Ejemplo de la división en subsecciones de una sección transversal para conocer la distribución de las velocidades del flujo. Se ha dividido de la siguiente manera: 2 subsecciones en la margen izquierda, 4 subsecciones en el cauce y 2 subsecciones en la margen derecha. Fuente: HEC-RAS.	50
Figura 12: Distribución de las velocidades del flujo de una sección transversal una vez indicada la división en subsecciones deseadas. Fuente: HEC-RAS.	51



Figura 13: Sección transversal y la componente horizontal de la inclinación del talud (Z). Fuente: elaboración propia.....	51
Figura 14: Ley de cortantes en el lecho y taludes de un canal trapezoidal y las isotacas de velocidad. La letra “B” corresponde con el ancho de la superficie libre, la letra “D” con la profundidad o calado y la letra “Z” con la componente horizontal de inclinación del talud. Fuente: Apuntes HF, UPM, 2013.....	54
Figura 15: Distribución del esfuerzo cortante o cortante del flujo en un tramo curvo. En oscuro aparecen las zonas donde el cortante de flujo aumenta como consecuencia de la curva. Además como veremos posteriormente en el proyecto “Rc” corresponde con el radio de curvatura y “Lp” con la longitud de protección aguas debajo de la curva. Fuente: Lays, 1999.....	55
Figura 16: Sección transversal de un conducto abierto y un conducto cerrado. Fuente: Rodríguez, 2008.....	56
Figura 17: Elementos geométricos de la sección transversal de un canal. Fuente: Ingeniería civil, 2015.....	56
Figura 18: Sección transversal de un cauce natural. Fuente: Rodríguez, 2008.....	57
Figura 19: Abaco para la estimación gráfica de los cortantes máximos del flujo en el lecho y en los taludes correspondiente a método nº 1. Fuente: Mays, 1999.	66
Figura 20: Abaco para la estimación gráfica del factor de mayoración por curvatura correspondiente al método nº 1. Fuente: Mays, 1999.	67
Figura 21: Ábaco para obtener los coeficientes en el lecho (izquierda) y en el talud (derecha) correspondiente al método nº 2 de estimación del cortante del flujo. Fuente: (USDA, 2007).....	71
Figura 22: Ábaco para obtener los coeficientes de mayoración en curva (izquierda) y la longitud de protección aguas abajo de la curva (derecha) correspondiente al método nº 2. Fuente: (USDA, 2007).....	72
Figura 23: Dimensiones y distribución transversal del cortante de flujo en un canal trapezoidal aplicando la metodología expuesta por Lane. Fuente: USDA, 2007.....	74



Figura 24: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.	83
Figura 25: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.	84
Figura 26: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.	84
Figura 27: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.	85
Figura 28: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.	85
Figura 29: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.	86
Figura 30: Geometría en planta correspondiente al tramo fuvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.	86
Figura 31: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.	87
Figura 32: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.	88
Figura 33: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fuvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.	89
Figura 34: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.....	90
Figura 35: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en el lecho de la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.	91
Figura 36: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 2. Fuente: elaboración propia.....	92



Figura 37: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 2. Fuente: elaboración propia.....	92
Figura 38: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.....	93
Figura 39: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.....	94
Figura 40: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.....	95
Figura 41: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.....	95
Figura 42: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 5.. Fuente: elaboración propia.....	96
Figura 43: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.....	97
Figura 44: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 1. Fuente: elaboración propia.	99
Figura 45: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.	100
Figura 46: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.	101



- Figura 47: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia..... 102
- Figura 48: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia..... 102
- Figura 49: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº3. Fuente: elaboración propia..... 104
- Figura 50: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia..... 104
- Figura 51: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia..... 105
- Figura 52: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia..... 106
- Figura 53: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia..... 107
- Figura 54: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia..... 107
- Figura 55: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 2. Para la representación en el gráfico, se han utilizado aquellos valores que han resultado ser máximos en cada método una vez comparados individualmente. Fuente: elaboración propia. 109



Figura 56: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.	111
Figura 57: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.	112
Figura 58: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.....	113
Figura 59: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 1.. Fuente: elaboración propia.....	113
Figura 60: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.....	114
Figura 61: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.....	115
Figura 62: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en de la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.	116
Figura 63: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.....	116
Figura 64: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.....	117
Figura 65: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.....	117



Figura 66: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 3. Fuente: elaboración propia.	119
Figura 67: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.	121
Figura 68: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fluvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.	122
Figura 69: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.....	122
Figura 70: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.....	123
Figura 71: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.....	124
Figura 72: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.....	124
Figura 73: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.....	125
Figura 74: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.....	125
Figura 75: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.....	126



- Figura 76: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia..... 126
- Figura 77: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 4. Para la representación en el gráfico, se han utilizado aquellos valores que han resultado ser máximos en cada método una vez comparados individualmente. Fuente: elaboración propia. 130
- Figura 78: Ejemplo de una sección transversal con su distribución de velocidades del flujo. Fuente: HEC-RAS. 134
- Figura 79: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio de la figura 76. Fuente: HEC-RAS..... 134
- Figura 80: Ejemplo de la entrada de variables en la aplicación informática correspondiente con la geometría de la sección transversal que se requiera estudiar. Fuente: elaboración propia. 135
- Figura 81: Ejemplo de la entrada de variables en la aplicación informática correspondiente a la sección transversal que se requiera estudiar. Fuente: elaboración propia..... 136
- Figura 82: Ejemplo de la entrada de variables en la aplicación informática correspondientes con la distribución de velocidades del flujo. Fuente: elaboración propia..... 136
- Figura 83: Entrada de variable en la aplicación informática correspondiente con la región ecológica perteneciente a la zona de estudio en la que se implanta la obra de bioingeniería. Fuente: elaboración propia. 137
- Figura 84: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a las variables de entrada en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia..... 139
- Figura 85: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la componente horizontal de inclinación del talud Z en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia. . 139



Figura 86: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes al cálculo de los diferentes cortantes del flujo en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.	140
Figura 87: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la distribución de los cortantes de flujo en el cauce (azul) y márgenes y el gráfico de barras correspondiente en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.....	140
Figura 88: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la distribución de los cortantes de flujo a lo largo de toda la sección transversal en la aplicación informática. Las filas de color azul corresponden con el lecho Fuente: elaboración propia.	141
Figura 89: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la distribución de los cortantes de flujo en una gráfica de dispersión en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.....	141
Figura 90: Consulta para la selección de técnicas de bioingeniería. Fuente: elaboración propia.....	142
Figura 91: Mapa de localización a menor escala del río Urumea. Fuente: geoportal del MAGRAMA.....	145
Figura 92: Geometría del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.....	146
Figura 93: Geometría 3D del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	147
Figura 94: Sección transversal 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).....	147
Figura 95: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 1 del tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	148
Figura 96: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.	151



Figura 97: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.	151
Figura 98: Sección transversal 7 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	152
Figura 99: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 7 del tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	152
Figura 100: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.	155
Figura 101: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.	155
Figura 102: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.	158
Figura 103: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.	161
Figura 104: Mapa de localización a menor escala del río Cañamares. Fuente: geoportal del MAGRAMA.	162
Figura 105: Geometría del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.	163
Figura 106: Geometría 3D del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	164
Figura 107: Sección transversal 1 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	165



Figura 108: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 1 del tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	165
Figura 109: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.	168
Figura 110: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.	168
Figura 111: Sección transversal 4 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	169
Figura 112: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 4 del tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).	169
Figura 113: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.	172
Figura 114: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.	172
Figura 115: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.	175
Figura 116: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.	178



Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Velocidad media en la sección (m/s).	47
Ecuación 2: Velocidad media en la sección dividida en subsecciones (m/s).	48
Ecuación 3: Velocidad media en la sección según Manning (m/s).	48
Ecuación 4: Cortante medio del flujo (N/m^2).	52
Ecuación 5: Componente de inclinación horizontal del talud 1: Z (V: H).	59
Ecuación 6: Distribución del cortante del flujo (N/m^2).	59
Ecuación 7: Cortante de flujo máximo en el lecho (N/m^2).	64
Ecuación 8: Coeficiente de mayoración para el lecho.	65
Ecuación 9: Cortante del flujo máximo en el talud (N/m^2).	65
Ecuación 10: Coeficiente de mayoración para el talud.	65
Ecuación 11: Cortante del flujo en curva (N/m^2).	67
Ecuación 12: Factor de mayoración por curvatura.	67
Ecuación 13: Cortante del flujo de referencia (N/m^2).	69
Ecuación 14: Pendiente de fricción asociada con la rugosidad de grano.	70
Ecuación 15: Rugosidad del grano.	70
Ecuación 16: Cortante máximo del flujo en el lecho, Lane (N/m^2).	73
Ecuación 17: Cortante máximo del flujo en el talud, Lane (N/m^2).	74
Ecuación 18: Cortante máximo del flujo en el lecho, Javid, S., & Mohammadi, M. (N/m^2).	75
Ecuación 19: Coeficiente de corrección μ	76



Ecuación 20: Coeficiente de corrección λ	76
Ecuación 21: Coeficiente de corrección β	76
Ecuación 22: Coeficiente de corrección δ	76
Ecuación 23: Cortante máximo del flujo en el talud, Javid,S., & Mohammadi,M. (N/m^2).	76
Ecuación 24: Cortante del flujo permisible (N/m^2).	79
Ecuación 25: Cortante máximo del flujo en el talud, T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (N/m^2).	80
Ecuación 26: Coeficiente que relaciona el cortante del flujo en el lecho y en el talud.	80
Ecuación 27: Cortante del flujo en curva, T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (N/m^2).	80
Ecuación 28: Coeficiente que relaciona el cortante del flujo con la curvatura.....	81
Ecuación 29: Longitud de protección (m).....	81
Ecuación 30: Sobre-elevación adicional debido al peralte (m).	82
Ecuación 31: Anchura de la superficie libre (m).....	137
Ecuación 32: Distribución de calados (m).	138
Ecuación 33: Calado máximo (m).	138
Ecuación 34: Radio hidráulico (m).	138

Índice de abreviaturas

A = Área del flujo (m^2).

b = Anchura del fondo (m).

B = Anchura de la superficie libre (m).

C = Coeficiente relacionado con la pendiente del talud.

CLA = Cota de la lámina de agua (m).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

Di = Calado de la estación (x) correspondiente (m).

D75 = Diámetro del grano (mm).

g = Aceleración debido a la gravedad (m/s^2).

K lecho = Coeficiente de mayoración para el lecho.

K talud = Coeficiente de mayoración para el talud.

K curva = Coeficiente de mayoración para curvatura.

K₁ = Coeficiente que relaciona el cortante de flujo en el lecho y en el talud.

Lp = Longitud de protección (m).

n = Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho.

ns = Rugosidad del grano.

P = Perímetro mojado (m).

Q = Caudal que atraviesa la sección (m^3/s).

Qi = Caudal que atraviesa la subsección i (m^3/s).

Rc = Radio de curvatura (m).

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

S = Área de la sección transversal (m^2).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Sem = Pendiente total de fricción obtenida de la ecuación de Manning, en tanto por uno.

SF = Factor de seguridad.

Si = Área de la subsección i (m^2).

St = Pendiente de fricción asociada con la rugosidad de grano, en tanto por uno.

V = velocidad media del flujo (m/s).

Vm = Velocidad media en la sección (m/s).

x = Estación (m).

X = Distancia entre estaciones o puntos (m).

y = Cota (m).

Y = Distancia entre cotas (m).

Z = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H).

Δd = sobre-elevación adicional debido al peralte (m).

α = Constante de conversión de unidades, 0,74 (SI) y 0,60 (CU).

θ = Grado de inclinación del talud (en grados centígrados $^{\circ}$).

τ = Cortante medio del flujo (N/m^2).

τ_i = Cortante medio del flujo (N/m^2) en la estación (x) correspondiente.

τ_{curva} = cortante de flujo como consecuencia de un tramo en curva (N/m^2).

$\tau_{\text{máx.}}$ = Cortante máximo del flujo en la sección transversal (N/m^2).

$\tau_{\text{máx. en lecho}}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m^2).

$\tau_{\text{máx. en talud}}$ = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m^2).

τ_p = Cortante de flujo permisible (N/m^2).

τ_{∞} = Cortante de flujo de referencia (N/m^2).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m^3).

δ = Coeficiente de corrección.

M = Coeficiente de corrección.

β = Coeficiente de corrección.

λ = Coeficiente de corrección.



1. Introducción

1.1. Formulación del problema

La Sociedad para la Restauración Ecológica (SER, 2015) define la **restauración** como el proceso encaminado a la recuperación de la integridad ecológica del medio, sobre la base de la variabilidad propia de estas zonas, en términos de biodiversidad y procesos y funciones ecológicas, en un contexto regional histórico, en el que se tengan en cuenta también los usos tradicionales sostenibles.

La restauración es, por tanto, un proceso complejo que debe iniciarse con el reconocimiento de los factores de alteración natural o de origen humano, responsables de la degradación de la estructura y funciones del ecosistema fluvial, o del deterioro en su capacidad de recuperación (Magdaleno, 2011). La restauración incluye un amplio conjunto de medidas diseñadas para permitir la recuperación natural del equilibrio dinámico y las funciones de los ecosistemas fluviales.

La **bioingeniería** aplicada a la restauración de ríos y riberas se fundamenta en el uso de plantas vivas o partes de éstas conjuntamente con otros materiales naturales (madera, rocas, mantas y redes orgánicas, metal) y otros sintéticos (geotextiles, redes y geomallas de polipropileno, etc.), incorporando y aprovechando los elementos locales (suelo, topografía, microclima, etc.) para conseguir objetivos estructurales en una actuación de restauración fluvial (Fundación Nueva Cultura del Agua, 2015).

Dentro de las técnicas de bioingeniería existen tres subdivisiones según el material que se utiliza:

- **Técnicas de ingeniería naturalística:** se trata de aquellas técnicas que utilizan material vivo y materias primas (troncos, piedras, tierra, etc.). La planta viva aporta la base de la estructura necesaria a largo plazo (Aquanea, 2014). Ejemplos: trenzado vivo (ver **figura 1**), fajina viva, ribalta, estaquillado y entramado vivo.



Figura 1: Técnica de ingeniería naturalística. Trenzado vivo. Fuente: *Aquanea*, 2014.

- **Técnicas de ingeniería biofísica:** técnicas que utilizan material vivo conjuntamente con productos elaborados (redes, geosintéticos, etc.). Con el tiempo será la planta viva la que aportará la base de la estructura necesaria (*Aquanea*, 2015). Ejemplos: manta orgánica, geomalla, geoceldas y fiber roll (ver figura 2).



Figura 2: Técnica de ingeniería biofísica. Fiber Roll TM. Fuente: *Aquanea*, 2014.

- **Técnicas de ingeniería estructural vegetales:** técnicas con productos fácilmente revegetables donde la planta viva mejora la estructura, pero los materiales constructivos son los que aportan la base estructural necesaria (*Aquanea*, 2014). Ejemplos: muros verdes, tierra armada, gavión de recubrimiento y gavión flexible (ver figura 3).



Figura 3: Técnica de ingeniería estructural vegetal. Gavión flexible. Fuente: *Aquanea*, 2014.

La **vegetación de ribera** cuenta con un importante papel ecológico (filtro, barrera, hábitat, ecotono, corredor, fuente y sumidero), hidráulico (resistencia al flujo, alteraciones del flujo y depósito y retención de sedimentos) y mecánico (resistencia del suelo y edafogénesis) en el ámbito fluvial. En consecuencia, las técnicas de bioingeniería que integran dicha vegetación mejoran considerablemente los ecosistemas fluviales y, en especial, combaten los procesos erosivos y aumentan la biodiversidad.

El uso de técnicas de restauración fluvial más “verdes” y en consonancia con la dinámica natural del río cuenta con una serie de ventajas: permiten mantener o mejorar la integridad ecológica, son autoadaptativas, son económicas, mejoran la estética paisajística y favorecen la participación social.

Sin embargo, las **técnicas de bioingeniería** son de aplicación relativamente reciente y prácticamente inexplorada. La falta de información de las diversas técnicas sumado a la falta de validación de resultados obtenidos con su implantación, hace necesario la investigación y recopilación bibliográfica de dichos resultados a través de distintos expertos en el campo de la restauración fluvial.

Para que la elección de la técnica de bioingeniería empleada sea la más adecuada, hay que tener en cuenta sus aspectos biológicos y físico-mecánicos. Por un lado, existe bastante información acerca de los aspectos biológicos determinantes a la hora de ejecutar una obra de bioingeniería. Por ejemplo:

- La preparación del terreno para revegetar: corresponde con aquellas actuaciones que permiten una preparación previa del terreno donde se plantará posteriormente, como por ejemplo, la corta, el desbrozado o el destoconado de especies vegetales que se pretenden eliminar.
- El marcado de hoyos: señalización de puntos del terreno donde se va a realizar las plantaciones. Se puede realizar por medios mecánicos o manuales y es recomendable la utilización de elementos claramente distintivos y que no puedan ser derribados o eliminados con facilidad.
- La apertura de hoyos: excavación del terreno para la incorporación de las plantaciones. Suele realizarse manualmente, con barrenas asociadas a un tractor, o con retroexcavadoras según las dimensiones de las plantas o la superficie de plantación y se debe profundizar hasta alcanzar el nivel mínimo de estiaje de la capa freática.
- La época de implantación: la plantación debe realizarse en la época de savia parada, es decir, entre mediados de otoño y mediados de primavera. Si bien, también se debe tener en cuenta las características propias de cada zona. Además, se debe plantar una vez haya comenzado el periodo de lluvias y evitar la época de heladas o nieve. (Magdaleno, 2011).
- Los riegos: cuando se llevan a cabo plantaciones de especies vegetales de ribera a raíz profunda, no suele ser necesario el riego de las plantas. En el resto de los casos, y en función de las características hidrológicas, físicas y ambientales del tramo en el que se lleva a cabo la plantación, puede ser aconsejable la consideración de riegos tras la plantación, en especial en los dos primeros periodos de estío posteriores a la misma. (Magdaleno, 2011).
- El tipo de planta: en las plantaciones asociadas a proyectos de revegetación suele utilizarse plantas pequeñas, de 1 o 2 savias, a raíz desnuda o en envase, o en algunos casos plantones. En el caso de los proyectos de restauración fluvial suelen utilizarse plantas algo mayores; asimismo, es frecuente el uso de varas de especies de géneros como *Populus* o *Fraxinus*, de 2-3 m de longitud (Magdaleno, 2011). Se debe tener en cuenta el lugar donde va a establecerse la plantación, el objetivo de la plantación y la relación coste/calidad. Además, es recomendable la utilización de plantas de pequeño tamaño puesto que cuentan con una mayor capacidad para superar el estrés de plantación (Magdaleno, 2011).

- El mantenimiento: actuaciones que permiten el mantenimiento de las plantaciones a lo largo del tiempo, como por ejemplo, el control de malezas, la poda, la nutrición y medidas de prevención y/o protección frente agentes abióticos y bióticos.

De distinta manera, los aspectos físico-mecánicos, que corresponden a los esfuerzos a los que se verá sometida una técnica de bioingeniería como consecuencia de la circulación del flujo, son difícilmente reflejados en documentos científicos o en empresas que se dedican a la venta de materiales de bioingeniería. Por lo tanto, apenas se tiene constancia de las limitaciones que presenta cada técnica de bioingeniería en cuanto a las acciones máximas del flujo que soportan.

Además, la metodología de cálculo de algunos de los parámetros que caracterizan a las acciones del flujo, como por ejemplo el cortante del flujo, se encuentra habitualmente estimadas en canales pero no en cauces naturales.

Por último, no existe ninguna aplicación o herramienta que permita conocer la técnica de bioingeniería que más se ajuste a las características propias de cada tramo fluvial. Generalmente, las técnicas se seleccionan según el conocimiento que se tenga de ellas, lo que puede provocar que, por falta de información de nuevas técnicas o por falta de comparación entre ellas, se realice una errónea obra de restauración fluvial.

Una errónea elección de la técnica de bioingeniería puede llevar a que las condiciones que se pretendían conseguir con su implantación no se alcancen. Por ejemplo, puede ocurrir que por el arrastre de materiales a causa de las acciones del flujo o por la muerte de las especies vegetales toda la obra se haya realizado en vano. Por lo tanto, conseguir que la técnica de bioingeniería se ajuste lo más posible a las características de un tramo de río es una de las limitaciones que pueden ocurrir actualmente y que con este proyecto se pretende resolver.

1.2. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo confeccionar una herramienta informática que permita determinar, conocidos un conjunto de parámetros, cuál es la técnica de bioingeniería más eficaz para la estabilización de taludes en el ámbito de la restauración de ríos.

Como parámetros implicados pueden citarse:

- Parámetros hidráulicos que permiten caracterizar la acción desestabilizadora del flujo: cortantes, calados, velocidades, anchura de lámina de agua, pendiente del lecho... En general estos parámetros serán el resultado de un proceso de modelización hidráulica del tramo. En este proyecto se trabaja principalmente con los parámetros correspondientes a los cortantes del flujo máximos en el lecho y talud además de las velocidades de flujo.
- Parámetros geométricos que permiten caracterizar la geometría y otras características de la sección a estudiar: pendiente y longitud del talud. En general estos parámetros serán el resultado de un levantamiento topográfico del tramo y/o sección.

Respecto a las técnicas de bioingeniería:

Es un objetivo muy importante dar a conocer a los usuarios la multitud de técnicas de bioingeniería que existen (Desde las que se han ido desarrollando desde los principios de su creación hasta las más modernas que se están empezando a implantar).

Se pretende dar un paso más allá y poder agrupar, en una base de datos, todas las posibles técnicas con sus distintas naturalezas y sus diversas características. Además, la instauración de la herramienta informática tiene un fin didáctico, de consulta y profesional.

El uso de la aplicación para seleccionar técnicas de bioingeniería está enfocado para acercar a estudiantes o expertos en restauración fluvial a dichas técnicas. Es importante concienciar a los usuarios de lo esencial que es estar informado acerca de los materiales que se usan a la hora de realizar una obra en este ámbito y seguir avanzando con la investigación y actualización de técnicas de restauración de ríos que permita unos ecosistemas sostenibles e integrados con el medio ambiente.

Respecto a la base de datos:

La realización de la base de datos debe contener una relación detallada y actualizada de las características principales de las técnicas de bioingeniería existentes. A través de una revisión bibliográfica y de la herramienta informática creada en este proyecto, se pretende dar solución a los problemas anteriormente expuestos y recopilar en una base de datos todas aquellas técnicas de bioingeniería con sus respectivas limitaciones hidráulicas y geométricas. Se recogen, para cada técnica, valores máximos de los cortantes de flujo, velocidades del flujo y pendientes del talud que permitan su



establecimiento. Además, se indica el campo de implantación, la época en la que realizar la obra y las especies vegetales recomendadas.

Respecto a la obtención de las fórmulas utilizadas:

Se pretende conseguir una sistematización de los cálculos empleados para conocer los valores limitantes de los parámetros anteriormente expuestos. Esta aplicación está pensada para que, sea cual sea el tramo de estudio, se den los resultados más fiables posibles acerca de las características del flujo y del talud de un determinado río y sus riberas.

La metodología de cálculo de los distintos parámetros que afectan a la consolidación de una técnica de bioingeniería, como es el caso del cortante del flujo, se va a seleccionar de acuerdo con su facilidad para implementarse en la aplicación informática y con su posibilidad para sistematizarse para cualquier tipo de cauce natural.

Además, se pretende estimar la distribución de los cortantes de flujo a lo largo de la sección transversal de un tramo de forma que de un resultado lógico, correcto y estandarizado para cualquier sección de un río.

Respecto a los resultados:

Una vez creada la base de datos y la metodología de cálculo de las variables que se requieren, los resultados de dichos cálculos son comparados con los resultados recogidos en la base de datos correspondiente a las características de cada técnica de bioingeniería.

Se podrá comparar conjuntamente los parámetros (velocidad máxima del flujo, el cortante máximo del flujo y la mayor pendiente del talud) o, si no se dispone de alguno de estos datos, se comparará por separado.

Es probable que en algunas ocasiones se ajusten varias opciones. En estas ocasiones, será el usuario el que deberá tomar la decisión de la técnica de bioingeniería que le convence más, ya sea por motivos estéticos, económicos, ecológicos, etc.

2. Esquema de trabajo

Con el objetivo de representar las ideas y fases del proyecto de forma esquemática y clara, se han realizado dos diagramas de flujo a distintas escalas: un primer diagrama más general y simplificado (ver **figura 4**), y un segundo diagrama con mayor grado de detalle (ver **figura 5**).

En primer lugar, se presenta un diagrama de flujo general y sencillo en el que se puede dividir el proyecto en tres grandes fases: investigación bibliográfica, creación de la herramienta o aplicación informática y comprobación de resultados con ejemplos reales.



Figura 4: Diagrama de flujo ilustrativo compuesto por tres fases que resumen el proyecto.
Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestra el diagrama de flujo correspondiente al proyecto de investigación que refleja, en un esquema gráfico detallado, las distintas fases y sus sub-fases que se han ido realizando para la elaboración de la aplicación informática.

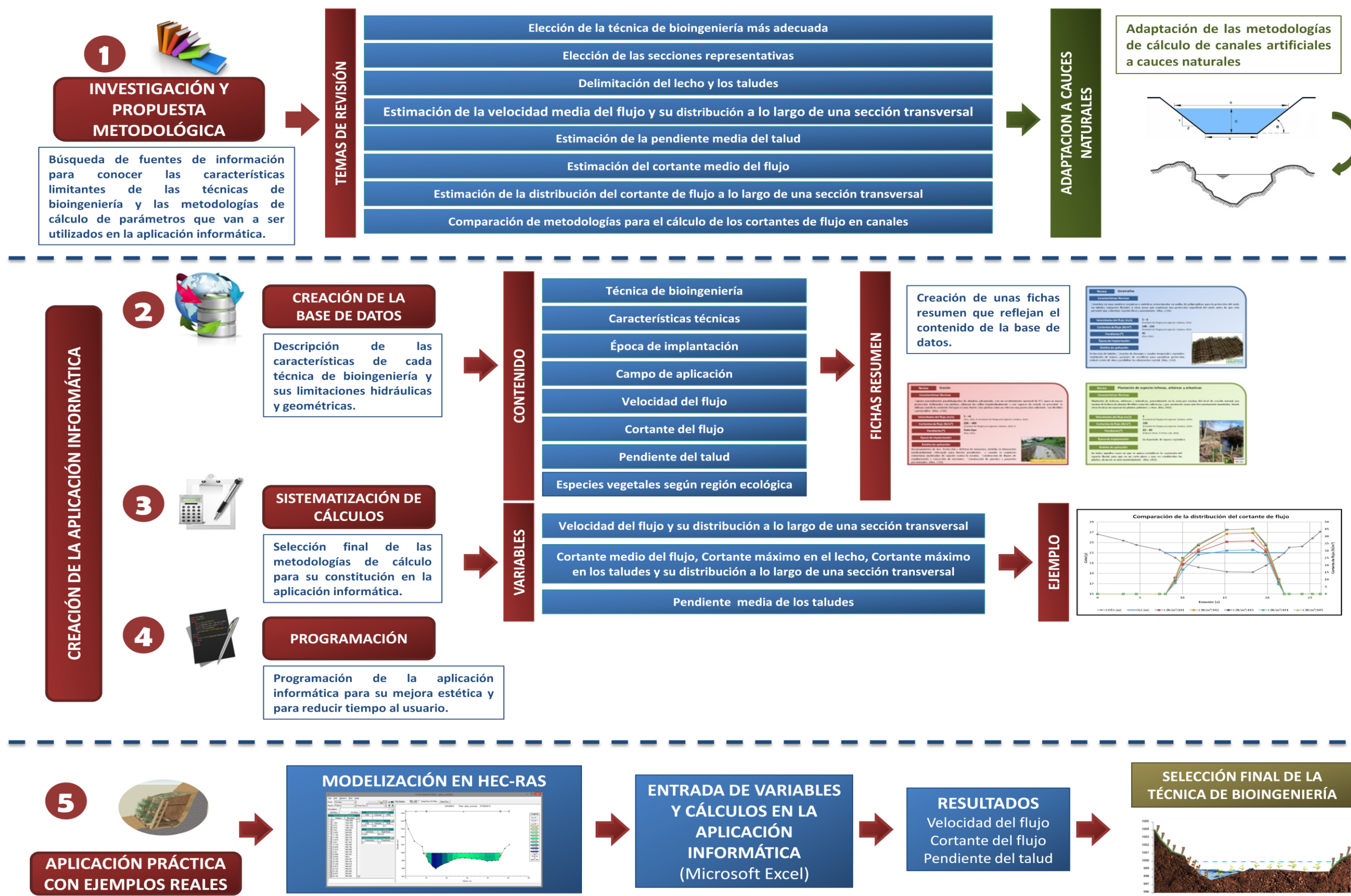


Figura 5: Diagrama de flujo que resume el proyecto con mayor grado de detalle. Fuente: elaboración propia.

2.1. Fuentes de información consultadas

Aunque se muestran en la bibliografía, se ha querido dedicar un apartado a las fuentes de información consultadas ya que ha supuesto una considerable parte en la elaboración del presente proyecto de investigación.

A raíz de las dificultades que se han encontrado para conocer las limitaciones de resistencia de cada material de bioingeniería, se ha procedido a la investigación bibliográfica de la información disponible acerca de dichas limitaciones además de otras características definitorias para poder ajustar lo más fielmente posible cada técnica de bioingeniería con las características hidráulicas y geomorfológicas de los cauces naturales.

Asimismo, con el objetivo de crear una herramienta informática que agrupe todas aquellas técnicas de bioingeniería y proponga al usuario la mejor opción para la restauración de un tramo fluvial, se ha realizado una revisión bibliográfica paralela para resolver los problemas de programación o metodología de cálculo necesaria para la correcta implantación de dicha herramienta.

A) Para la descripción y características de las técnicas de bioingeniería

El conocimiento de las numerosas técnicas de bioingeniería existentes junto con las características de sus materiales y sus limitaciones ha sido el resultado de un amplio abanico de fuentes. A continuación, se reflejan las distintas fuentes de información junto con algún ejemplo:

- Documentos científicos: corresponden con el estudio de las técnicas de restauración fluvial en diferentes ámbitos por expertos en dicha materia. Como ejemplo destacan los estudios:
 - González Sánchez, M., Sánchez Martínez, F. J., Aparicio Martín, M., & Saiz de la Hoya Zamacola, A. (2011). *Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos*. Dirección Técnica de TRAGSA.
 - Herrera Grao, T. (2005). *Viabilidad de técnicas y materiales de bioingeniería para la naturalización de tramos intervenidos con influencia de mareas y oleajes*.

- Sánchez Martínez, F.J., García Días, J., & Aparicio Martín, M. (2012). Experiencias obtenidas en el estudio de la aplicación de distintas técnicas de bioingeniería en varias actuaciones en el marco de la estrategia nacional de restauración de ríos.
- Revistas científicas: boletines semanales, mensuales o trimestrales en los que se tratan temas de restauración fluvial, innovaciones o noticias relevantes sobre el tema de estudio del presente proyecto. Como ejemplo destaca: el boletín informativo SAUCE de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos, elaborado por la Dirección General del Agua entre los años 2009-2012 y editado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Libros y manuales: corresponden con publicaciones que incluyen los aspectos fundamentales de la materia de restauración fluvial y, en concreto, sobre las técnicas de bioingeniería. Como ejemplo destacan los manuales:
 - Magdaleno Mas, F. (2011). *Manual de técnicas de restauración fluvial*. CEDEX.
 - Palmeri, F., Silván, F., & Prieto Caló, I. (2002). *Manual de Técnicas de Ingeniería Naturalística en Ámbito fluvial*. Dirección de Aguas del Gobierno Vasco.
 - Zeh, H. (2007). *Ingeniería Biológica. Manual Técnico*.
 - Eubanks, C. E., & Meadows, D. (2002). *A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization*. United States Department of Agriculture.
- Documentos facilitados por los tutores del proyecto y profesionales en el ámbito de la restauración fluvial: temas de estudios procedentes de las asignaturas relevantes al tema del presente proyecto y comunicaciones de diferentes congresos en los que se tratan los temas de restauración de ríos y técnicas de bioingeniería. Como ejemplo destacan:
 - Ferández Yuste, J. A., & Martínez Santa-María, C. (2013). *Prevención y corrección de Impactos en Ecosistemas Acuáticos. Restauración Hidromorfológica de Ríos II*. Universidad Politécnica de Madrid.

- Fernández Yuste, J. A., & Martínez Santa-María, C. (2012). *Hidráulica Fluvial. Principios básicos del movimiento de un fluido en lámina libre. Modelización 1D*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Jornadas sobre bioingeniería. I + D + I Europea en la estabilización de taludes y riberas. Años 2011 Y 2013.
- Fichas técnicas de productos: corresponden con las fichas técnicas de los materiales de bioingeniería que presentan las distintas empresas que los venden y, en ellas, se reflejan las características más significativas así como el campo de aplicación, sus dimensiones o limitaciones. Como ejemplo destacan las empresas:
 - Naturalea, 2014 [consulta 20-10-2014] . Disponible en: <http://www.naturalea.eu/>.
 - Bonterra Ibérica S.L., 2014 [consulta 07-10-2014] . Disponible en: <http://www.controlerosion.es>.
 - Aquanea S.L. Bioingeniería Aplicada al Paisaje, 2014 [consulta 15-10-2014]. Disponible en: <http://www.aquanea.com/>.

B) Para la creación y organización de la aplicación informática

Paralelamente a la revisión bibliográfica anteriormente comentada, se ha realizado una investigación de fuentes de información en lo relativo al diseño hidráulico en canales para conocer la metodología de cálculo que más se ajuste a la sistematización informática y a los cauces naturales. Además, se han revisado aquellas fuentes necesarias para la correcta función de la herramienta informática en lo que respecta a la programación y al manejo de los distintos programas informáticos utilizados.

- Libros sobre diseño hidráulico en canales: libros o manuales sobre diseño hidráulico en los que se establecen diferentes criterios o metodologías para el cálculo de parámetros hidráulicos como, por ejemplo, el cortante de flujo en canales artificiales. Como ejemplo destaca:
 - Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*. International Journal of Engineering.



- T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings. Hydraulic Engineering Circular Number 15, Third Edition.*
- USDA. (2007). *Stream Restoration Design National Engineering.* United States Department of Agriculture.
- W Mays, L. (1999). *Hydraulic Design Handbook.* McGraw-Hill.
- Manuales de la aplicación informática de modelización hidráulica “Hydrologic Engineering Center - River Analysis System” (HEC-RAS): manuales que establecen las pautas para un correcto uso de la aplicación y suponen un importante apoyo para la creación de la herramienta informática. La modelización en HEC-RAS es el paso previo antes de introducir los datos hidráulicos y geométricos de los tramos de estudio en la herramienta informática. Como ejemplo destaca:
 - W. Brunner, G. (2010). *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.*
- Libros de programación y bases de datos: corresponde con manuales en los que se explica los métodos de programación, lo macros y demás funciones en la aplicación informática Microsoft Office Excel para la correcta implantación de la herramienta informática del presente proyecto. Como ejemplo destaca:
 - Pallerola Comamala, J.. (2011). *Las Macros en Microsoft Excel 2010.* 2ª Edición.
- Foros sobre programación: foros en los que se resuelven dudas acerca de la programación en Microsoft Office Excel.
- Video-tutoriales: videos subidos en internet en los que los usuarios explican dudas o dan clases virtuales acerca de la programación en Microsoft Office Excel.

3. Base de datos de las técnicas de bioingeniería

Mediante la investigación y recopilación bibliográfica de distintas fuentes de información, se ha creado la base de datos necesaria para la herramienta informática cumpliendo con los objetivos anteriormente expuestos en el apartado **1.2.Objetivos**. La base de datos es el primer paso para la realización de este proyecto y se considera el más importante, puesto que supone el marco de referencia para comparar los resultados obtenidos en la aplicación y agrupa toda la información dispersa que se ha encontrado sobre las técnicas de bioingeniería.

3.1. Contenido de la base de datos para cada material o técnica de bioingeniería

Una vez reunida toda la información que se ha sacado de las diversas fuentes anteriormente expuestas en el apartado **2.1. Fuentes de información consultadas**, se ha procedido a seleccionar la información más relevante, actualizada y disponible. El contenido de la base de datos está compuesto por los siguientes campos:

Técnica de bioingeniería

Se agrupan las técnicas de bioingeniería en tanto sean técnicas de ingeniería naturalística, biofísica o estructural vegetal.

Características técnicas

Las características técnicas suponen una descripción de cada una de las actuaciones de bioingeniería así como los elementos naturales o materiales necesarios para su correcta implantación en los ríos. Las diversas técnicas de bioingeniería pueden contar con materiales vivos y partes de éstos (especies vegetales), elementos naturales (madera, roca, mantas orgánicas, etc.) y/o materiales sintéticos (redes de polipropileno, hormigón celular, estructuras metálicas, etc.).

Época de implantación

La época de implantación contempla el momento en el tiempo en el que es más adecuada la implantación de las técnicas de bioingeniería según los elementos o materiales de los que se componen cada una de ellas. Por lo general, si la técnica está formada por elementos naturales como son las especies vegetales, la época de

implantación corresponde con el inicio o el final de la parada vegetativa. Sin embargo, si la técnica de bioingeniería no cuenta con elementos vegetales, el momento de la obra de restauración fluvial podrá realizarse en cualquier fecha del año pero siempre teniendo en cuenta cada tramo fluvial en particular y sus características.

Campo de aplicación

El campo de aplicación corresponde con el ámbito en el que las técnicas de bioingeniería resuelven el problema que se pretende mitigar o corregir. Por ejemplo, mientras que para algunos ámbitos fluviales el problema principal es el oleaje o la velocidad del flujo, para otros casos el principal problema es la pendiente. Por lo tanto, según las características del río unas técnicas de bioingeniería se ajustan más que otras a la hora de realizar una obra de restauración fluvial.

Velocidad del flujo

La velocidad del flujo de una corriente es aquella velocidad con la que el agua fluye en el canal, expresado en m/s. En la base de datos dicha velocidad se divide en velocidad del flujo mínima, media y máxima, según los datos disponibles que se hayan encontrado respecto de cada técnica de bioingeniería.

Cortante del flujo

El cortante del flujo corresponde con el empuje del agua sobre el lecho de un cauce o canal en la dirección del flujo y se expresa en N/m^2 . En la base de datos, el cortante de flujo se divide al igual que la velocidad en cortante de flujo mínimo, medio y máximo para cada una de las técnicas de bioingeniería, dando así un rango de valores de resistencia para su implantación.

Pendiente

Se puede definir la pendiente como el grado de inclinación de una superficie que se mide en relación con la horizontal y se expresa en grados. En la base de datos, la pendiente expresada en grados se divide en pendiente mínima y máxima, según los datos disponibles de las diversas fuentes de información.

Asimismo, en actuaciones de ingeniería civil o hidráulicas, la pendiente de un talud también se puede expresar mediante la componente horizontal de inclinación del talud (Z). En la base de datos, también está contemplada esta opción puesto que es usada con bastante frecuencia.

Especies vegetales recomendadas.

Las especies vegetales son el elemento más esencial en las técnicas de bioingeniería, puesto que generalmente se ven incorporadas en la mayoría de las obras de restauración de ríos. Por lo tanto, es verdaderamente importante conocer las especies que más se ajusten a cada tramo del río y en consecuencia, a su región ecológica.

Por lo general, una buena consideración es utilizar las plantas autóctonas que rodean la zona donde se realizará la obra de ingeniería. Sin embargo, si el usuario desconoce las especies vegetales que debe utilizar o desea saber si una especie podría ajustarse a su ámbito de implantación, la base de datos cuenta con un listado de especies vegetales recomendadas para cada región ecológica. Ver **Anexo II: Especies vegetales recomendadas según la región ecológica.**

Fuentes de información.

En cada uno de los anteriores campos, se refleja la fuente de información de dónde se ha sacado la información relacionada con cada uno de ellos.

3.2. Creación de la base de datos

La herramienta que utiliza este estudio para la creación de la base de datos se realiza mediante Microsoft Office Excel. En dicha aplicación informática se plasman, en una hoja Excel, todos aquellos campos anteriormente mencionados en el apartado **3.2. Contenido de la base de datos para cada material o técnica de bioingeniería.** A continuación, se muestra un ejemplo de la estructura de la base de datos mediante la creación de la **tabla nº 1.**

Técnica de bioingeniería	Características técnicas	Velocidad del flujo (m/s) *	Cortante del flujo (N/m ²) **	Pendiente del talud (°) ***	Componente horizontal de la inclinación del talud (Z)	Época de implantación	Campo de aplicación
Nº 1							
Nº 2							
Nº 3							

Tabla 1: Ejemplo de la estructura de la base de datos de la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.

* La velocidad del flujo queda dividida en tres campos diferentes en la base de datos real: velocidad del flujo mínima, velocidad del flujo media y velocidad del flujo máxima.

** El cortante del flujo también queda dividido en tres campos diferentes en la base de datos real: cortante del flujo mínimo, cortante del flujo medio y cortante del flujo máximo.

*** La pendiente en grados queda dividida en dos campos distintos en la base de datos real: pendiente mínima y pendiente máxima.

Además, debajo de cada celda se indica la fuente de información de dónde se ha obtenido cada dato o descripción.

3.3. Fichas técnicas para cada material o técnica de bioingeniería

Con el objetivo de reflejar en este proyecto de investigación cada una de las técnicas de bioingeniería con sus respectivas características y limitaciones, se ha procedido a realizar unas fichas resumen que pueden verse en el **Anexo I: Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería**.

4. Estimación de las solicitaciones del flujo

La elección de las técnicas de restauración fluvial más adecuadas para que una obra de este tipo tenga éxito depende de diversos factores y, además, debe tenerse en cuenta en que secciones del tramo del río se debe modelizar y estudiar el comportamiento de la masa de agua para que el resultado sea lo más fiable posible. Por ello, a continuación se muestran las pautas para la caracterización hidráulica junto con las secciones que deben ser elegidas para su implantación.

Las mayores dificultades que se han encontrado a la hora de realizar el presente proyecto de investigación ha resultado ser la estimación de las solicitaciones del flujo, es decir, la metodología para el cálculo de los parámetros hidráulicos de la velocidad del flujo y el cortante del flujo además de la estimación de la pendiente. La elección de dicha metodología tendría que ajustarse a los cauces naturales y poder sistematizarse informáticamente para cual sea las características geomorfológicas e hidráulicas de los ríos. En los apartados siguientes se muestran cómo se han resuelto estos problemas y la elección de estimación de las solicitaciones del flujo que se han escogido.

4.1. Elección de las secciones representativas

A la hora de realizar una modelización hidráulica en 1D, se deberán seleccionar secciones representativas. Estas secciones no son más que perfiles transversales del cauce que van a incorporar la geometría principal del sistema fluvial y que deberán ser suficientemente representativas.

Estas secciones transversales son necesarias en todos los puntos representativos a lo largo del río y en ellas deberán reflejarse tanto el lecho del cauce como sus llanuras de inundación (ver **figura 6**). Asimismo, dichas secciones marcan diferencias o cambios en cuanto a morfología de la sección, pendiente, estructuras hidráulicas, entradas o salidas de caudal, etc.

Por lo tanto, la **geometría en HEC-RAS** la componen fundamentalmente un conjunto de secciones transversales representativas, espaciadas a una determinada distancia, y dispuestas a lo largo de un eje que viene a representar la dirección principal de la corriente. Además, en HEC-RAS, cada sección transversal viene identificada por un número (teniendo en cuenta como origen del tramo el punto de aguas abajo del mismo) y el tramo del río en el que se encuentra la sección.



Figura 6: Ejemplo de un tramo fluvial con indicación de secciones transversales representativas. Fuente: Comunidad ISM, 2015.

4.2. Estimación de la velocidad media del flujo

Estimación de la velocidad media del flujo de forma teórica

La velocidad media en una sección transversal de una corriente es aquella velocidad que, supuesta constante en todos los puntos de la sección, genera un caudal igual al real y se expresa en m/s. Se obtiene al dividir el caudal por el área de la sección transversal. Por lo tanto, la fórmula a aplicar se muestra a continuación a través de la **ecuación nº 1**.

Ecuación 1: Velocidad media en la sección (m/s).

$$V_m = \frac{Q}{S}$$

Donde:

V_m = Velocidad media en la sección (m/s).

Q = Caudal que atraviesa la sección (m³/s).

S = Área de la sección transversal (m²).

Sin embargo, en los cauces naturales las velocidades no son uniformes para toda la sección ya que el rozamiento con el perímetro mojado o contorno, e incluso con el propio aire, origina variaciones importantes en el valor de la velocidad en una sección transversal.

Si se analiza el perfil de velocidades de un canal, se puede observar que la velocidad en el fondo de dicho cauce es igual a cero e irá incrementándose a medida que se acerca a la superficie libre, encontrándose el mayor valor de la velocidad un poco por debajo de la misma, debido al rozamiento con el aire (ver **figura 7**).

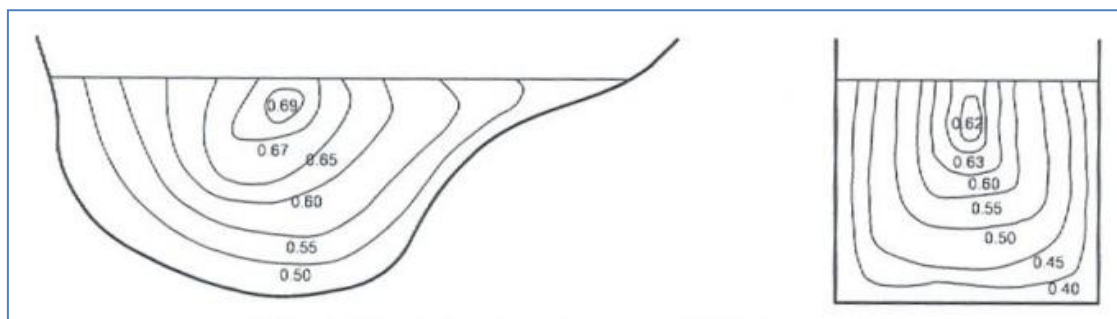


Figura 7: Ejemplo de la distribución de la velocidad en un cauce natural y en un canal rectangular a través de líneas de igual velocidad o isotacas. Fuente: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Cátedra de Ingeniería Rural, 2015.

Por lo tanto, habría que dividir dicha sección transversal en tantas subsecciones como sea conveniente. Para simplificar, la distribución de velocidades puede dividirse en tres subsecciones: margen izquierda, cauce principal y margen derecha (ver **figura 8**). En consecuencia, la fórmula a aplicar se muestra a continuación a través de la **ecuación 2**.

Ecuación 2: Velocidad media en la sección dividida en subsecciones (m/s).

$$V_m = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{S} = \frac{V_{m1} * S_1 + V_{m2} * S_2 + V_{m3} * S_3}{S}$$

Donde:

V_m = Velocidad media en la sección (m/s).

Q_i = Caudal que atraviesa la subsección i (m³/s).

S = Área de la sección transversal (m²).

S_i = Área de la subsección i (m²).

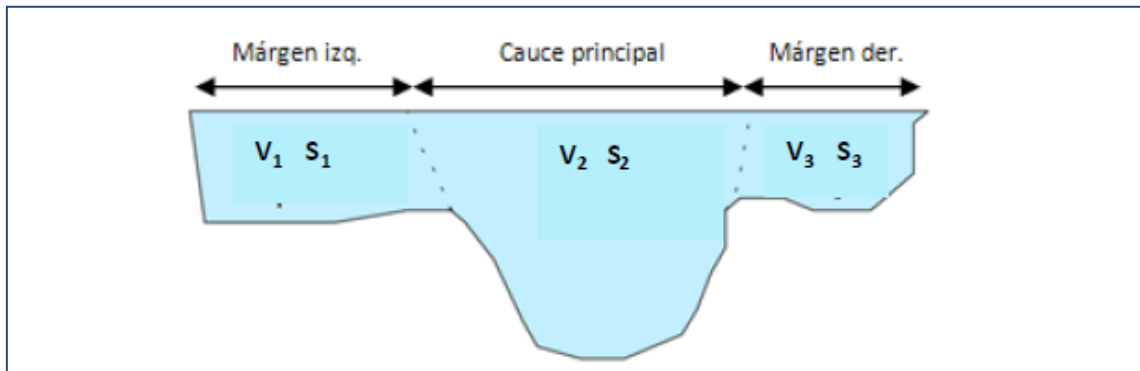


Figura 8: Representación gráfica de un ejemplo de las subsecciones para la estimación de la velocidad media en la sección. Fuente: Apuntes HF, UPM, 2013.

La velocidad media en flujo uniforme, además de por la fórmula anteriormente expuesta, se puede obtener mediante la **ecuación nº 3** formulada por Manning, 1889.

Ecuación 3: Velocidad media en la sección según Manning (m/s).

$$V_m = \frac{R h^{2/3} * S e^{1/2}}{n}$$

Donde:

V_m = Velocidad media en la sección (m/s).

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

n = Coeficiente de rugosidad.

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Estimación de la velocidad de flujo mediante la modelización hidráulica: HEC-RAS

La velocidad media para cada margen y para el cauce principal puede obtenerse directamente mediante la aplicación informática HEC-RAS, introduciendo la correspondiente geometría del cauce y los datos de los caudales del tramo que se requiera para su estudio. A continuación, en la **figura 9** se refleja un ejemplo de una sección transversal con la distribución de velocidad del flujo por defecto que da HEC-RAS para un tramo determinado de estudio.

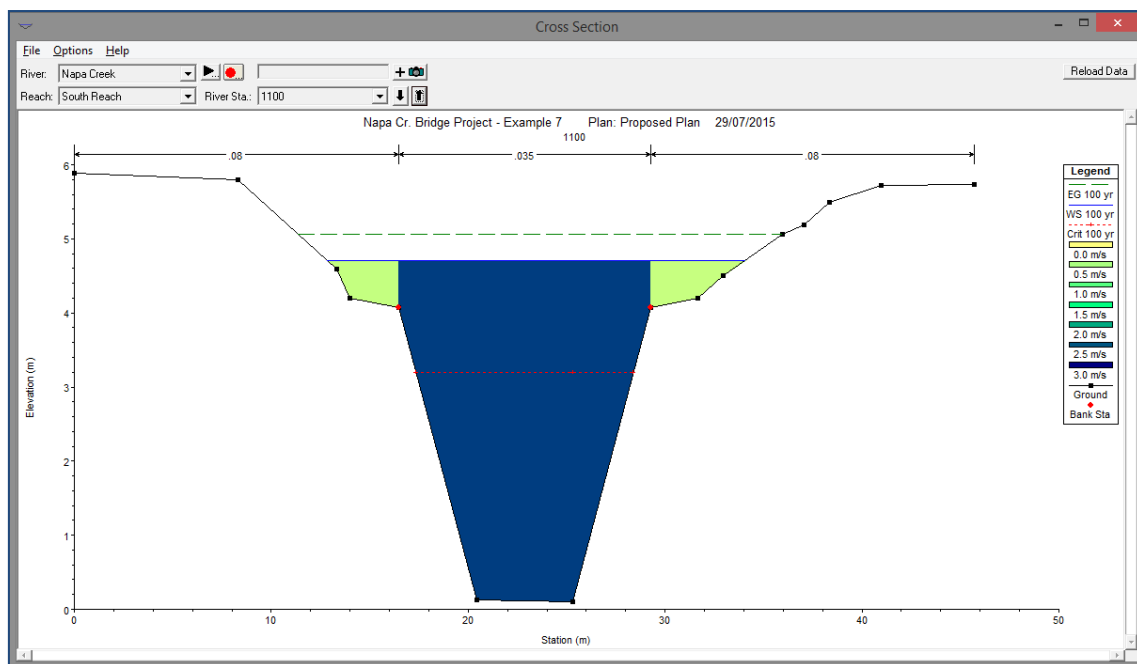


Figura 9: Ejemplo de la distribución de la velocidad del flujo a lo largo de una sección transversal. Fuente: HEC-RAS.

Además, HEC-RAS nos permite conocer la distribución de velocidades en una sección transversal con tantas subsecciones como el usuario indique. Para ello, una vez dentro de HEC-RAS, se selecciona el icono correspondiente a “Steady Flow Analysis” y en la pestaña de “Options” se selecciona “Flow Distribution Location” (ver **figura 10**).

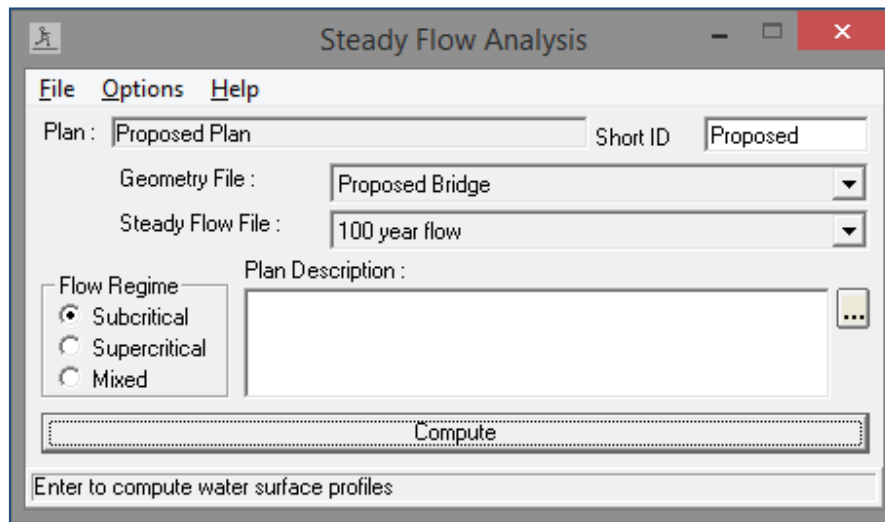


Figura 10: Ventana correspondiente al comando “Steady Flow Analysis”. Fuente: HEC-RAS.

Con esta opción, el usuario es capaz de indicar tantas subsecciones como quiera y, por lo tanto, HEC-RAS mostrará la distribución de velocidades pertenecientes a cada una de estas subsecciones (ver **figura 11** y **figura 12**).

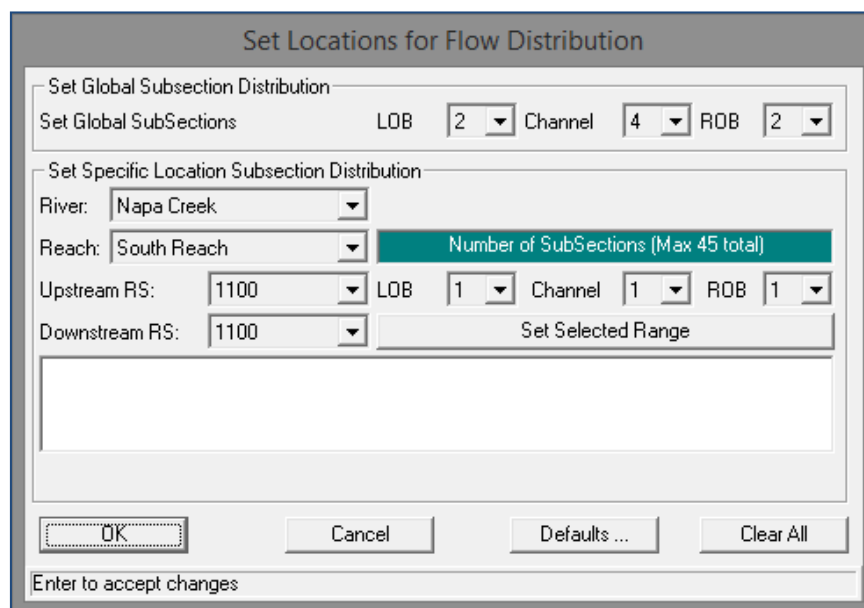


Figura 11: Ejemplo de la división en subsecciones de una sección transversal para conocer la distribución de las velocidades del flujo. Se ha dividido de la siguiente manera: 2 subsecciones en la margen izquierda, 4 subsecciones en el cauce y 2 subsecciones en la margen derecha. Fuente: HEC-RAS.

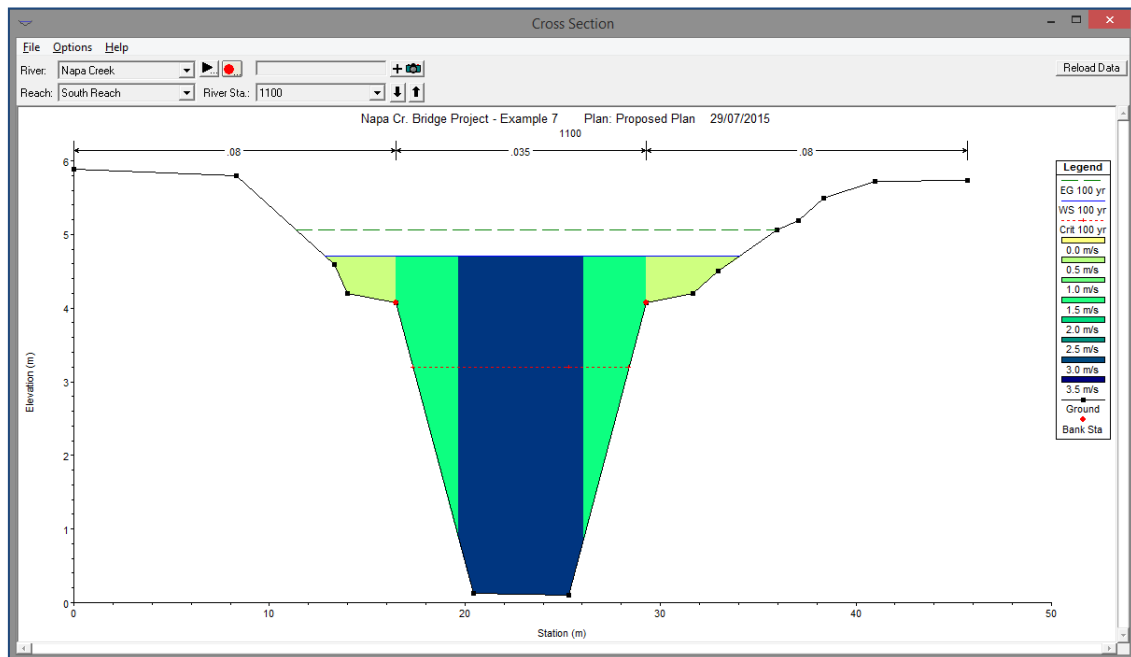


Figura 12: Distribución de las velocidades del flujo de una sección transversal una vez indicada la división en subsecciones deseadas. Fuente: HEC-RAS.

4.3. Estimación de la pendiente del talud

Se puede definir la pendiente como el grado de inclinación de una superficie que se mide en relación con la horizontal y se expresa en grados. Asimismo, se puede definir la pendiente de un talud como el grado de inclinación respecto a la horizontal de las laderas o márgenes de un río. En actuaciones de ingeniería civil o hidráulicas, la pendiente de un talud se puede expresar en grados o mediante la componente horizontal de inclinación del talud (Z) que queda reflejada en la **figura 13**.

Para calcular el grado de inclinación del talud a través del valor de Z , bastaría con hacer la cotangente del ángulo de inclinación del talud.

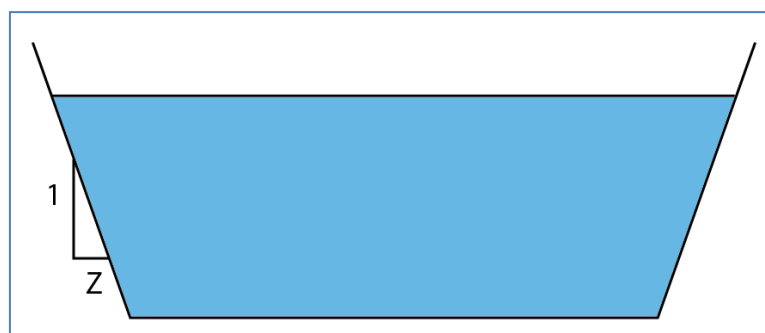


Figura 13: Sección transversal y la componente horizontal de la inclinación del talud (Z). Fuente: elaboración propia.

Estimación de la pendiente mediante el levantamiento topográfico

Los levantamientos topográficos son una serie de operaciones necesarias para conseguir un modelo plani-altimétrico o exclusivamente planimétrico de una parte del terreno. En terrenos muy extensos resulta imprescindible apoyarse en la geodesia.

Existen dos etapas a la hora de realizar dichos levantamientos topográficos:

- Trabajo en campo: en los puntos elegidos (estaciones), se sitúan los instrumentos de medida y se registran las observaciones.
- Trabajo en Gabinete: se calculan las distancias reducidas, desniveles, pendientes... y todas aquellas operaciones precisas para dibujar un plano.

4.4. Estimación del cortante del flujo

4.4.1. Concepto y estimación del cortante medio del flujo en una sección

Cuando el agua fluye en un canal, se desarrolla una fuerza que actúa sobre el lecho de éste en la dirección del flujo. Esta fuerza, la cual es simplemente el empuje del agua sobre el área mojada, se conoce con el nombre de **cortante del flujo** o esfuerzo cortante. El cortante medio del flujo se representa a través de la siguiente **ecuación nº 4** y se expresa en N/m².

Ecuación 4: Cortante medio del flujo (N/m²).

$$\tau = \gamma * Rh * Se$$

Donde:

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

El valor de τ es fundamental para conocer cuando en un río se inicia el arrastre de partículas y por tanto la erosión del lecho y taludes. Por consiguiente, para la estimación de los cortantes en la sección transversal de un tramo de río hay que tener en cuenta lo siguiente: existen dos tipos de cortantes que se deben tener en cuenta a la hora de aplicar técnicas de restauración fluvial, el cortante de flujo y el cortante

crítico. Para que una actuación sea estable y no se cumpla la condición de inicio de movimiento, el cortante crítico deberá ser mayor o igual al cortante del flujo.

Actuación estable: **Cortante crítico > Cortante de flujo**

Cortante de flujo (τ_f): Depende de las características hidráulicas (calado y pendiente del cauce) y evalúa la acción del flujo que tiende a mover la partícula.

Cortante crítico (τ_{cr}): Depende de las características del material (naturaleza y tamaño) y evalúa el valor del cortante mínimo necesario para que dicha partícula empiece a moverse.

4.4.2. Efecto de los flujos secundarios

Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad del flujo no es uniforme a lo largo de una sección de un canal o cauce y desarrolla una mayor fuerza centrífuga cerca de la superficie libre. Además, existen corrientes secundarias que actúan en los tramos curvos y que afectan a la distribución de la velocidad del flujo en la sección.

Existe una estrecha relación entre la fuerza de tracción y la velocidad del flujo, por lo que, en un flujo uniforme con una distribución normal de velocidad, el cortante del flujo es igual a la componente de la fuerza gravitacional que actúa sobre el cuerpo de agua paralelo al fondo del canal. (Mays, 1999).

Sin embargo, el cortante del flujo no se distribuye uniformemente a lo largo del perímetro mojado en un canal o cauce natural. Este esfuerzo cortante se ve afectado por varios factores, incluyendo: la densidad de las partículas del suelo, el coeficiente de fricción del suelo sumergido, la pendiente de los taludes y del lecho, y la dirección del flujo. (Mays, 1999).

El esfuerzo cortante varía dentro de una sección principalmente en función de la profundidad del lecho (calado) y del radio hidráulico (Superficie mojada entre el perímetro mojado de una sección) además de la componente horizontal de inclinación del talud Z.

El valor máximo del cortante del flujo en el lecho se encuentra en el centro del canal o en el punto con calado máximo en cauces naturales y el cortante máximo en taludes corresponde con el punto donde empieza el talud y termina el lecho en canales. Además, el valor del cortante del flujo va tendiendo a cero a lo largo de los taludes hasta llegar a la superficie libre.

A continuación, se muestra en la **figura 14** un diagrama en el que se observa la distribución de cortantes del flujo a lo largo de una sección transversal de un canal trapezoidal.

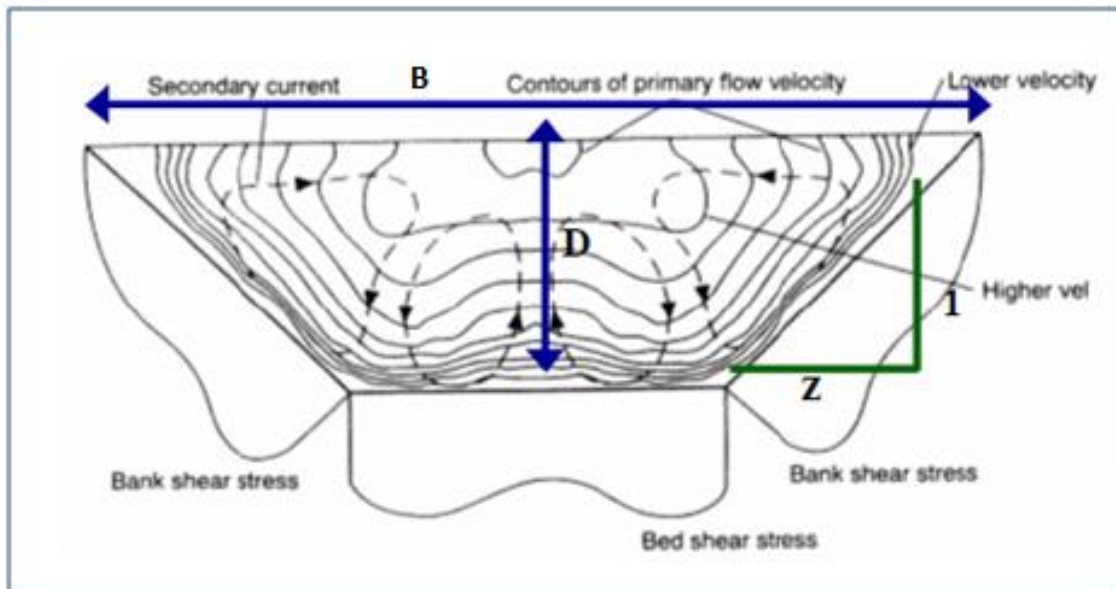


Figura 14: Ley de cortantes en el lecho y taludes de un canal trapezoidal y las isotacas de velocidad. La letra “B” corresponde con el ancho de la superficie libre, la letra “D” con la profundidad o calado y la letra “Z” con la componente horizontal de inclinación del talud. Fuente: Apuntes HF, UPM, 2013.

4.4.3. Efecto de la curvatura de un tramo fluvial

El flujo alrededor de una curva crea corrientes secundarias que provocan un aumento del esfuerzo cortante en las orillas del lecho y en la parte exterior en comparación con un tramo recto (Lays, 1999). El esfuerzo cortante máximo se encuentra relacionado con el radio de curvatura y con la anchura de la superficie libre.

Al comienzo de la curva, el cortante del flujo máximo se encuentra cerca del interior de la curva y se va moviendo hacia el exterior cuando el flujo sale de la misma. Además, este aumento del esfuerzo cortante permanece aguas abajo de la curva una cierta longitud como puede observarse en la **figura 15**.

Una consideración final para el diseño de un canal en las curvas es el aumento de la elevación de la superficie del agua en el exterior de la curva causada por el peralte de la superficie del agua.

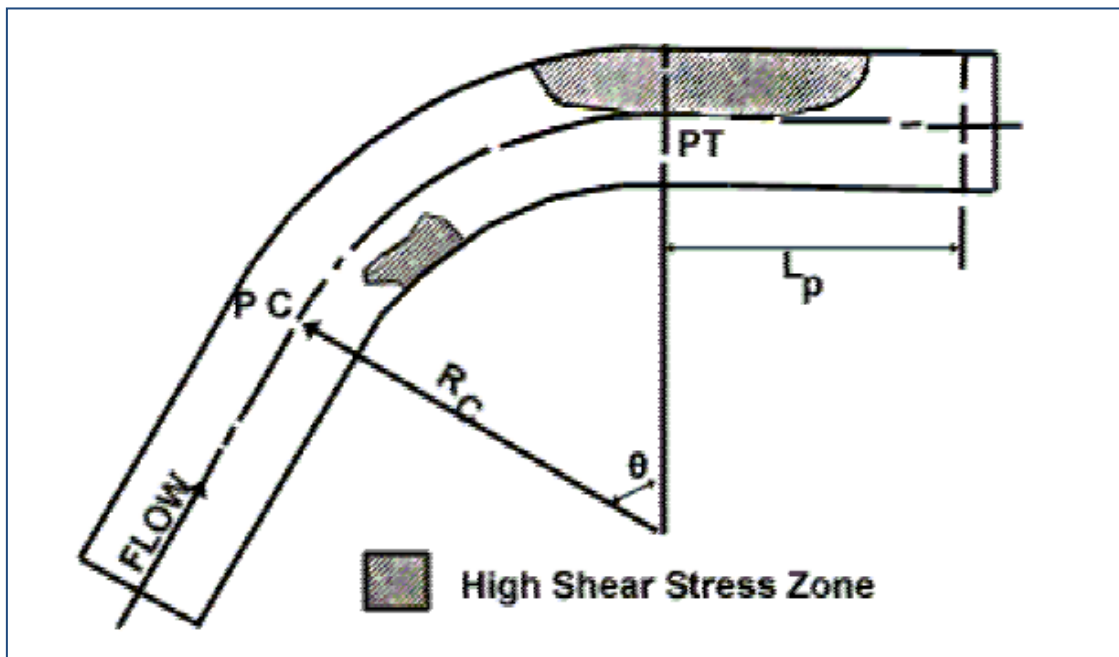


Figura 15: Distribución del esfuerzo cortante o cortante del flujo en un tramo curvo. En oscuro aparecen las zonas donde el cortante de flujo aumenta como consecuencia de la curva. Además como veremos posteriormente en el proyecto “ R_c ” corresponde con el radio de curvatura y “ L_p ” con la longitud de protección aguas abajo de la curva. Fuente: Lays, 1999.

4.5. Adaptación de las metodologías de cálculo en canales a cauces naturales

4.5.1. Introducción

Los canales son conductos abiertos o cerrados en los cuales el agua circula debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera (ver **figura 16**); esto quiere decir que el agua fluye impulsada por la presión atmosférica y de su propio peso. (Rodríguez, 2008).

Los canales artificiales son todos aquellos contruidos o desarrollados mediante el esfuerzo de la mano del hombre, y usualmente se diseñan con forma geométricas regulares (prismáticos), con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante. Las secciones transversales más comunes son las siguientes: trapezoidal, rectangular, triangular y parabólica.

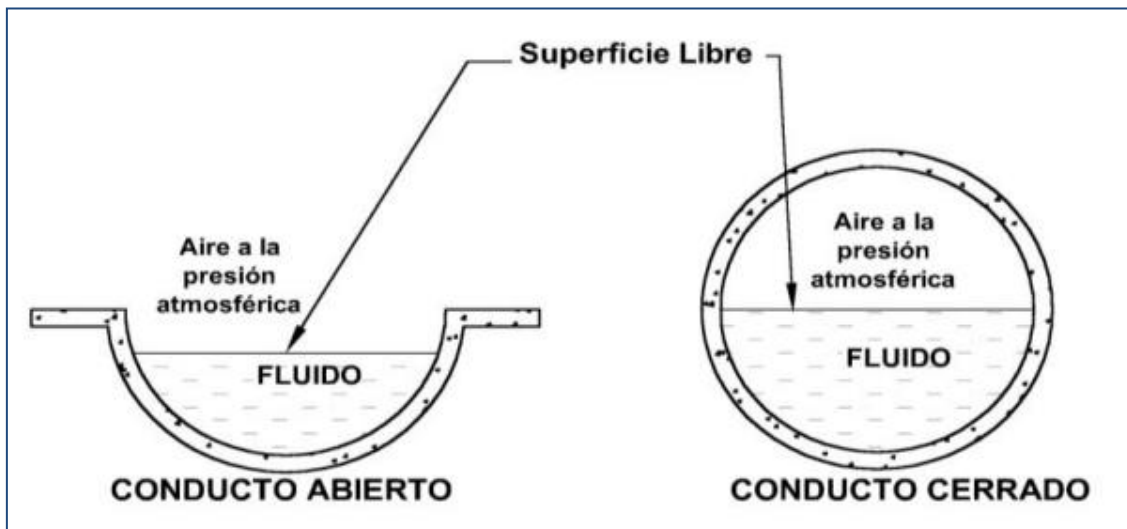


Figura 16: Sección transversal de un conducto abierto y un conducto cerrado. Fuente: Rodríguez, 2008.

A continuación, en la **figura 17** se muestra un ejemplo de una sección trapezoidal de un canal abierto con sus diferentes componentes o parámetros con el objetivo de que sea más fácil la comprensión del presente proyecto de investigación.

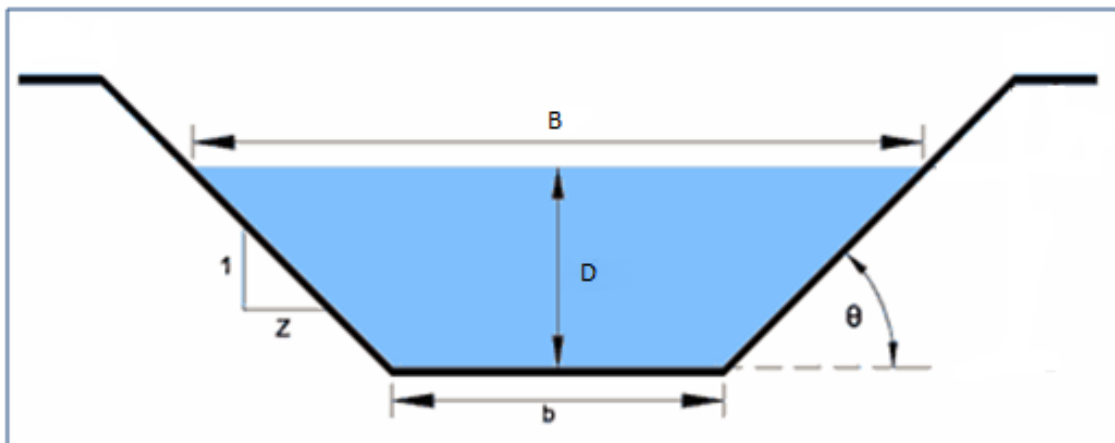


Figura 17: Elementos geométricos de la sección transversal de un canal. Fuente: Ingeniería civil, 2015.

Donde:

B = Anchura de la superficie libre, en m.

b = Base del canal o anchura del fondo, en m.

D = Calado o profundidad del cauce, en m.

θ = Ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal, en grados.

Z = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H).

Sin embargo, en este proyecto el objetivo es sistematizar y generalizar las metodologías de cálculo de los cortantes del flujo, la velocidad del flujo y la pendiente del talud (entre otros parámetros) teniendo en cuenta cauces naturales.

Los cauces naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, ríos pequeños y grandes, arroyos, lagos y lagunas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales. La sección transversal de un canal natural es generalmente de forma muy irregular y variable durante su recorrido, lo mismo que su alineación y las características de los lechos (Rodríguez, 2008) como se puede observar en la **figura 18**.

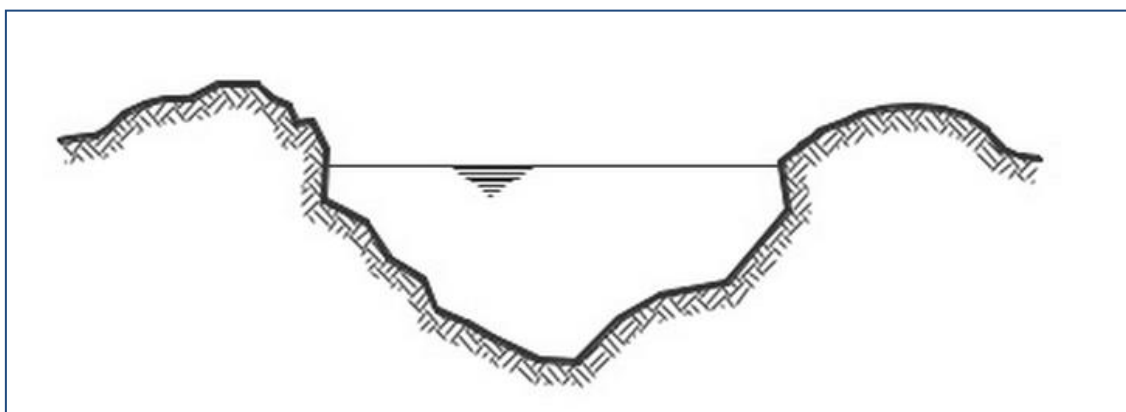


Figura 18: Sección transversal de un cauce natural. Fuente: Rodríguez, 2008.

4.5.2. Problemas de la generalización de resultados a un cauce natural

Existen diversos problemas o limitaciones a la hora de sistematizar informáticamente las solicitudes del flujo en un tramo de un cauce natural. A continuación, se explican los principales problemas que han surgido con la realización de la aplicación informática para la selección de técnicas de bioingeniería.

Delimitación del lecho y las márgenes

La aplicación informática HEC-RAS da al usuario los puntos donde termina el lecho y empiezan las márgenes en una determinada sección transversal. Sin embargo, dichos punto no tiene por qué coincidir con los que el usuario requiera para su modelización de un tramo fluvial o para el cálculo de los parámetros hidráulicos y geométricos necesarios para su posterior introducción en la aplicación informática creada para este proyecto.

Estimación de la pendiente del talud

La pendiente media en los taludes o para cada subsección de una sección transversal se halla, como se ha visto anteriormente, realizando un levantamiento topográfico.



Este hecho condiciona que el usuario tenga que realizar un trabajo de gabinete previo a la modelización de un tramo fluvial. Además, la pendiente en los taludes puede expresarse tanto en grados centígrados como con la componente horizontal de inclinación Z, creando una cierta confusión a la hora de sistematizar el parámetro correspondiente.

Estimación de los cortantes del flujo

La generalización del cortante del flujo a cauces naturales no está resuelta. Después de la revisión bibliográfica en las diversas fuentes de información anteriormente citadas en el presente proyecto, se ha llegado a la conclusión de que únicamente se han resuelto las metodologías de cálculo de dicho parámetro para canales artificiales, especialmente, en canales con secciones trapezoidales. En los posteriores apartados **4.6. Revisión bibliográfica y selección de los métodos de estimación de los cortantes del flujo**, **4.7. Aplicación de la metodología de estimación de los cortantes del flujo** y **4.8. Selección final de la metodología de cálculo**, se resuelve este problema.

Estimación de la distribución de cortantes de flujo a lo largo de una sección transversal

La generalización de la distribución de los cortantes en cauces naturales no ha sido estudiada o no ha sido encontrada en la anterior revisión bibliográfica de fuentes de información.

Como se ha visto anteriormente, los cortantes de flujo dependen de: el peso específico del agua (γ), el Radio hidráulico (R_h) y la pendiente de la línea de energía (Se). Por lo tanto, no se puede afirmar que para una sección transversal de un cauce natural exista únicamente un cortante de flujo determinado si no que, en cada punto de dicha sección, existe un valor distinto del esfuerzo cortante.

4.5.3. Criterios para la generalización del resultado a cauces naturales

Delimitación del lecho y las márgenes

Para la resolución del problema sobre la delimitación del lecho y márgenes, la aplicación informática creada para el presente proyecto preguntará al usuario los puntos correspondientes con el inicio de la margen y el final del lecho. A raíz de este paso, la aplicación calculará el resto de parámetros necesarios para la final selección de técnicas de bioingeniería.

Estimación de la pendiente del talud

Conocidos los puntos de las estaciones (x) y de las cotas (y) de una sección transversal de un río que aporta la herramienta informática HEC-RAS, se puede obtener la pendiente de cada subsección o la pendiente media de los taludes a través de una sencilla ecuación (ver **ecuación nº 5**) que se muestra a continuación y que calcula la componente horizontal de inclinación del talud Z. Si se quiere calcular la pendiente media, los puntos a considerar serán (1 y 2) el inicio y el final de cada talud.

Ecuación 5: Componente de inclinación horizontal del talud 1: Z (V: H).

$$\frac{1}{Z} = \frac{Y}{X} = \frac{|Y1 - Y2|}{|X1 - X2|}$$

Donde:

Y = Distancia entre cotas (m).

X = Distancia entre estaciones o puntos (m).

Z = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H).

Estimación de la distribución de cortantes de flujo a lo largo de una sección transversal

A raíz del problema correspondiente con la generalización de la distribución del esfuerzo cortante, en este proyecto de investigación se ha llegado a sistematizar los cálculos para conocer la distribución de los cortantes del flujo a lo largo de una sección transversal determinada.

Para resolver el problema, se ha utilizado una fórmula en la que se tiene en cuenta el punto donde el cortante del flujo es máximo en el lecho y la profundidad o calado en la que se encuentra cada punto de una sección transversal. A continuación, se muestra la fórmula utilizada a través de la **ecuación nº 6**.

Ecuación 6: Distribución del cortante del flujo (N/m²).

$$\frac{\tau_i}{\tau_{\text{máx. en lecho}}} = \frac{D_i}{D}$$

Donde:

τ_i = Cortante medio del flujo (N/m²) en la estación (x) correspondiente.

$\tau_{\text{máx. en lecho}}$ = Cortante máximo del flujo en la sección transversal (N/m²).

D_i = Calado de la estación (x) correspondiente (m).

D = Calado máximo en la sección transversal (m).

En el posterior estudio correspondiente al apartado **4.7.4. Aplicación y resultados**, en el que se estudia y compara la metodología de cálculo de los cortantes del flujo, se crean tres tipos de distribución de dicho parámetro.

Opción A (τ)

La **opción A**, representada con la sigla “ τ ”, corresponde con los resultados obtenidos simplemente realizando la **ecuación nº 6** de distribución de cortantes reflejada en el apartado **4.5.3. Criterios para la generalización del resultado a cauces naturales**, a través del dato del cortante máximo en el lecho (**τ máx. en lecho**), el calado máximo en la sección transversal (**D**) y el calado de la estación (x) correspondiente (**Di**).

Opción B (τ^*)

La **opción B**, representada con la sigla “ τ^* ”, hace una distribución independiente en el lecho y en los taludes. En el lecho, utiliza el mismo procedimiento que en la **opción A** según la **ecuación nº 6** y teniendo en cuenta el cortante máximo en el lecho (**τ máx. en lecho**). Sin embargo, para los taludes utiliza como cortante máximo a distribuir (**τ máx. en talud**) el obtenido por la ecuación correspondiente según la metodología de cálculo.

Opción C (τ curva)

La **opción C**, representada con la sigla “ **τ curva**”, es el resultado de aplicar un coeficiente de mayoración al resultado obtenido en la **opción B**. Esta mayoración sólo se aplica en el talud correspondiente a la margen exterior de secciones transversales en curva.

4.6. Revisión bibliográfica y selección de los métodos de estimación de los cortantes del flujo

Con el objetivo de seleccionar el método de cálculo óptimo para utilizar en la aplicación informática que se ha creado en el presente proyecto, se ha realizado una revisión bibliográfica de diversos métodos para la estimación de cortantes de flujo. De entre diversas metodologías de cálculo, se han preseleccionado cinco teniendo en cuenta diversas consideraciones iniciales.

Aplicación en cauces naturales

La aplicación de las metodologías de estimación de los esfuerzos cortantes para cauces naturales ha sido la consideración más importante y la más buscada para la selección

final del método que se usaría en la aplicación informática. Sin embargo, no se ha encontrado ningún método en el que se solucione dicho problema ya que sólo aparecen estudios para canales artificiales. Esta situación ha provocado que se tengan que buscar otras consideraciones iniciales que se acerquen lo más posible al objetivo que se está buscando.

Uso habitual en Ingeniería hidráulica

El uso habitual en ingeniería hidráulica ha sido otra de las consideraciones que se han tenido en cuenta a la hora de preseleccionar las metodologías de estimación de los esfuerzos cortantes. Este hecho es importante puesto que al ser métodos estudiados a la vez que utilizados realmente en obras de este ámbito, da una cierta seguridad de que la metodología de cálculo se puede ajustar a los cauces naturales.

Datos de fácil obtención

Para la estimación de los cortantes de flujo, cada método requiere una serie de parámetros o datos. Por lo tanto, cuanto más sencillas sean las ecuaciones y los cálculos, menos problemas aparecen a la hora de sistematizar las metodologías de cálculo en la aplicación informática. Además, como en el presente proyecto se utiliza previamente el programa informático HEC-RAS, conseguir que todos los datos provengan de dicho programa soluciona la mayor parte de los problemas asociados a la búsqueda de datos o parámetros.

Adecuación a la aplicación informática

Para poder sistematizar la estimación de los cortantes de flujo para cualquier sección transversal de un río, hay que estudiar si la metodología de cálculo se adapta a la aplicación informática. Esta consideración es realmente importante ya que si no se puede sistematizar el método, no tiene sentido su utilización en este proyecto de investigación.

Adecuación para tramos curvos

Una consideración final es que los métodos para la estimación de cortantes de flujo tengan en cuenta que en los tramos curvos el valor de dicho parámetro aumenta. Por lo tanto, aunque se pueda utilizar la estimación de los esfuerzos cortantes en curva de un método y ajustarlo a otro, tendrá prioridad aquél método que ya lleve incorporado esta consideración.

A continuación, se muestran las cinco metodologías de cálculo preseleccionadas en la **tabla nº 2** que refleja las consideraciones iniciales que se cumplen en cada uno de ellos. Para dicha selección previa y su posterior estudio y comparación, se ha tenido en cuenta que los métodos al menos cumplan dos consideraciones.

En color gris aparecen aquellas consideraciones que no se cumplen y, en color verde, aquellas consideraciones que si que se cumplen. Además, en color amarillo aparece una consideración que aunque no se ha demostrado que se cumpla, se cree que pueda cumplirse puesto que es un estudio científico para canales artificiales utilizados en obras hidráulicas.

	MÉTODOS				
	1.Mays, 1999.	2.USDA, 2007.	3. Lane, 1952.	4. Javid & Mohammadi, 2012.	Kilgore & Cotton, 2005.
Cauces naturales	-	-	-	-	-
Uso en ingeniería hidráulica	✓	✓	-	+	✓
Datos de fácil obtención	✓	✓	✓	-	✓
Adecuación a la aplicación informática	-	-	✓	✓	✓
Adecuación para tramos curvos	✓	✓	-	-	✓

Tabla 2: Tabla que muestra las consideraciones iniciales que se cumplen en cada uno de los métodos de estimación del cortante del flujo que han sido seleccionados previamente para el posterior estudio. Fuente: elaboración propia.



4.7. Aplicación de la metodología de estimación de los cortantes del flujo

4.7.1. Introducción

Una vez realizada la selección previa de las metodologías de cálculo de los esfuerzos cortantes, se va a realizar un estudio en más profundidad sobre los cinco métodos anteriormente expuestos.

El primer paso corresponde con la presentación de cada uno de los métodos, en los que aparecerán los autores y el libro o estudio dónde han sido encontrados además de las ecuaciones que utilizan para la estimación de los esfuerzos cortantes.

El segundo paso consta de una presentación de los tramos tipos que van a ser seleccionados para probar cada método y así, poder tener una posterior comparación de los resultados.

En el tercer paso se realizará dicha comparación de resultados utilizando para cada tramo las ecuaciones de estimación de los cortantes del flujo correspondientes a los cinco métodos previamente seleccionados.

Por último, una vez estudiadas las diferentes metodologías, se seleccionará aquella que más se ajuste con el objetivo que el presente proyecto persigue. Dicho objetivo unirá los resultados obtenidos en la comparación de metodologías con las consideraciones iniciales anteriormente expuestas.

4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo

Con el objetivo de utilizar la metodología de cálculo y las fórmulas que más se ajusten a nuestra aplicación informática, se ha realizado una investigación bibliográfica sobre los diversos métodos de estimación del cortante de flujo en canales artificiales para su posterior utilización en cauces naturales.

Método nº 1: Mays, 1999. Hydraulic Design Handbook.

El primer método ha sido sacado del capítulo 16 “*Hydraulic design of flood control channels*” del libro “*Hydraulic Design Handbook*” del autor Larry Mays en el año 1999. En este capítulo, George K. Cotton describe la secuencia de cálculos de los distintos cortantes de flujo que se verán a continuación.

Estimación del cortante medio del flujo (τ)

El primer paso para la estimación del cortante de flujo corresponde con la estimación previa del cortante medio en el lecho. Depende del peso específico de agua con sedimentos (γ), del radio hidráulico (R_h) y de la pendiente de la línea de energía del flujo (Se) como puede apreciarse en la **ecuación nº 4**. Las unidades correspondientes son N/m^2 .

Ecuación 4:

$$\tau = \gamma * R_h * Se$$

Donde:

τ = Cortante medio del flujo (N/m^2).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m^3).

R_h = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Estimación del cortante máximo del flujo en el lecho y en el talud ($\tau_{\text{máx}}$)

Una vez hallado el cortante medio, se procede a calcular el cortante máximo en el lecho y en el talud a través de unas ecuaciones que relacionan la anchura de la superficie libre (B) con el calado (D) además de la componente horizontal de inclinación (Z) (ver **figura 14**, **ecuación nº 7** y **ecuación nº 9**). Dichas ecuaciones sirven únicamente cuando dicha relación (B/D) es mayor que 8 (ver **ecuación nº 8** y **ecuación nº 10**).

Cortante máximo del flujo en el lecho

Ecuación 7: Cortante de flujo máximo en el lecho (N/m^2).

$$\tau_{\text{máx en lecho}} = \tau * K_{\text{lecho}}$$

Donde:

$\tau_{\text{máx en lecho}}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m^2).

τ = Cortante medio del flujo (N/m^2).

K_{lecho} = Coeficiente de mayoración para el lecho.

Fórmula correspondiente al factor K para el lecho**(Cuando la relación B/D es mayor que 8)****Ecuación 8: Coeficiente de mayoración para el lecho.**

$$K_{lecho} = \frac{\frac{B}{D} + 2\sqrt{Z^2 + 1}}{\frac{B}{D} + Z} \quad \text{para } \frac{B}{D} > 8$$

Donde:

K lecho = Coeficiente de mayoración para el lecho.**B** = Anchura de la superficie libre (m).**D** = Calado máximo de la sección en cauces (m).**Z** = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H).**Cortante máximo del flujo en el talud****Ecuación 9: Cortante del flujo máximo en e talud (N/m²).**

$$\tau_{\text{máx en talud}} = \tau * K_{\text{talud}}$$

Donde:

τ máx en talud = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m²).**τ** = Cortante medio del flujo (N/m²).**K talud** = Coeficiente de mayoración para el talud.**Fórmula correspondiente al factor K para el talud****(Cuando la relación B/D es mayor que 8).****Ecuación 10: Coeficiente de mayoración para el talud.**

$$K_{talud} = C * \left(\frac{\frac{B}{D} + 2\sqrt{Z^2 + 1}}{\frac{B}{D} + Z} \right) \quad \text{para } \frac{B}{D} > 8$$

Z	C
1,5	0,76
2	0,785
3	0,85
4	0,935
6	0,97

Donde:

K talud = Coeficiente de mayoración para el talud.**B** = Anchura de la superficie libre (m).**D** = Calado máximo de la sección en cauces (m).**Z** = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H).**C** = Coeficiente relacionado con la pendiente del talud.

Ábaco para la estimación gráfica del factor de mayoración de curvatura K (Cuando la relación B/D es menor que 8)

En los anteriores dos casos, las fórmulas para la estimación del cortante máximo en el lecho y en los taludes sólo pueden aplicarse si la relación de la anchura de la superficie libre y el calado es mayor que 8. Cuando la relación B/D es menor que 8 se utilizan unas curvas de mayoración como se muestra en la **figura 19**. Estas curvas relacionan la anchura de la superficie libre y el calado (B/D) con la pendiente del talud (Z) dando un factor K de mayoración que multiplica al cortante medio.

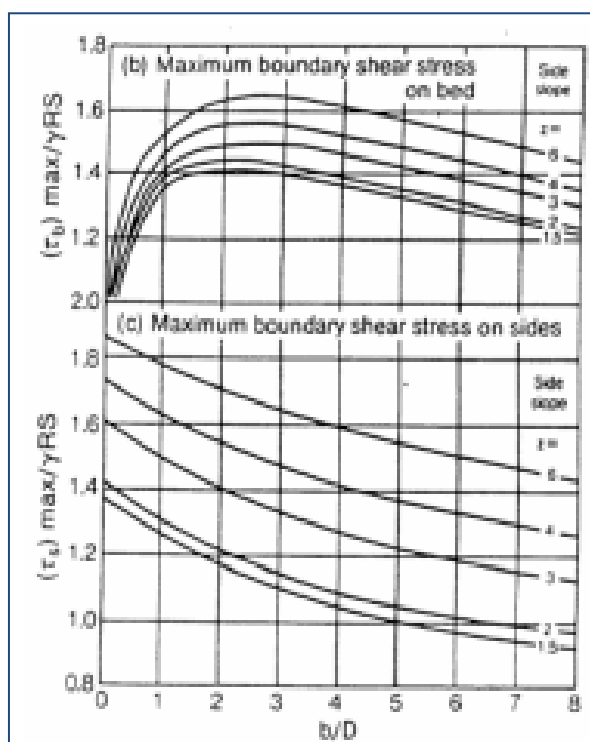


Figura 19: Abaco para la estimación gráfica de los cortantes máximos del flujo en el lecho y en los taludes correspondiente a método nº 1. Fuente: Mays, 1999.

Estimación del coeficiente de mayoración por curva

El cortante de flujo de un determinado tramo fluvial puede verse influenciado según su morfología y, específicamente, en las curvas. Por lo tanto, si en el tramo de estudio la sección corresponde con una curva, se empleará el factor de mayoración por curva en la margen externa de dicho tramo fluvial. El factor de curvatura (K curva) puede aplicarse mediante una ecuación (ver **ecuación nº 11** y **ecuación nº 12**) o mediante un ábaco de estimación gráfica que se refleja en la **figura 20**.

El procedimiento, según el libro "*Hydraulic design Handbook*. (Larry w. Mays.) ", se realizará multiplicando al cortante medio del flujo por dicho factor de mayoración.

Cortante del flujo en curva

Ecuación 11: Cortante del flujo en curva (N/m²).

$$\tau_{\text{curva}} = \tau * K_{\text{curva}}$$

Donde:

τ_{curva} = cortante de flujo como consecuencia de un tramo en curva (N/m²).

τ = Cortante medio del flujo (N/m²).

K_{curva} = Coeficiente de mayoración para curvatura.

Factor de mayoración por curvatura mediante una ecuación

Ecuación 12: Factor de mayoración por curvatura.

$$K_{\text{curva}} = 2,4 * e^{-0,0852 * \frac{R_c}{B}}$$

Donde:

K_{curva} = Coeficiente de mayoración para curvatura.

R_c = Radio de curvatura (m).

B = Anchura de la superficie libre (m).

Ábaco para la estimación gráfica del factor de mayoración por curvatura

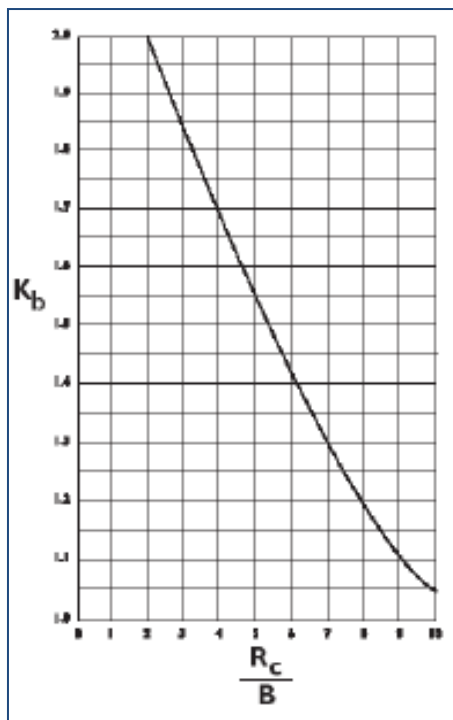


Figura 20: Abaco para la estimación gráfica del factor de mayoración por curvatura correspondiente al método nº 1. Fuente: Mays, 1999.



Limitaciones

Una vez presentado el primer método, las limitaciones que han surgido simplemente con la observación de las fórmulas y el procedimiento de cálculo son las siguientes:

1. No se puede sistematizar completamente dicho método puesto que se necesita utilizar las curvas de las gráficas anteriores cuando la relación B/D es menor que 8 y sólo se puede calcular el cortante de flujo para 5 tipos de pendientes (Z) diferentes.
2. Los autores del libro *“Hydraulic Design Handbook”*, Larry Mays y George K. Cotton, publicaron en 1999 la metodología de cálculo anteriormente mostrada. Sin embargo, dicho procedimiento de cálculo no corresponde con ese año, si no que se remonta al año 1970 y se considera que el método podría estar demasiado anticuado.
3. El estudio del método se ha realizado únicamente teniendo en cuenta una sección trapezoidal de un canal artificial, por lo que limita bastante la sistematización para aplicarlo en cauces naturales.
4. Aunque los datos son de fácil obtención, su adecuación para la aplicación informática no es del todo correcta y las fórmulas son un tanto complicadas en comparación con los posteriores métodos de estudio.

Método nº 2: United States Department of Agricultura (USDA), 2007. Stream Restoration Design National Engineering Handbook.

El segundo método de estudio fue elaborado en el año 2007 por el “United States Department of Agricultura” (USDA). Dicha metodología de cálculo para la estimación de los esfuerzos cortantes queda expuesta en el libro “*Stream Restoration Design National Engineering Handbook*” y, en particular, en el capítulo 8 “*Threshold Channel Design*”.

El propósito de dicho capítulo es ofrecer una visión general y la descripción de las técnicas más comunes para el diseño de un canal umbral. Un canal umbral es aquel donde la tensión aplicada durante las condiciones de diseño es inferior a la tensión admisible para el límite de un canal.

Estimación del cortante medio del flujo (τ)

Como en el método anterior, el cortante medio del flujo se calcula atendiendo a la **ecuación nº4**.

Ecuación 4:

$$\tau = \gamma * Rh * Se$$

Donde:

τ = Cortante medio del flujo (N/m^2).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m^3).

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Si la anchura de la superficie libre es más de 10 veces la profundidad, el Radio hidráulico se iguala al calado máximo en la sección.

Estimación del cortante del flujo de referencia (τ_∞)

Según Lane (1952) y la ecuación de Limerinos (ver **ecuación nº 13**) se puede obtener un cortante de flujo que actúa sobre los granos en un canal infinitamente amplio y que sirva de referencia para calcular el cortante real.

Ecuación 13: Cortante del flujo de referencia (N/m^2).

$$\tau_\infty = \gamma * D * St$$

Donde:

τ_{∞} = Cortante de flujo de referencia (N/m^2).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m^3).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

St = Pendiente de fricción asociada con la rugosidad de grano, en tanto por uno.

Para obtener la pendiente de fricción asociada con la rugosidad de grano (St) se aplica la **ecuación nº 14**.

Ecuación 14: Pendiente de fricción asociada con la rugosidad de grano.

$$St = \left(\frac{ns}{n}\right)^2 * Sem$$

Donde:

St = Pendiente de fricción asociada con la rugosidad de grano, en tanto por uno.

ns = Rugosidad del grano.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho.

Sem = Pendiente total de fricción obtenida de la ecuación de Manning, en tanto por uno.

Asimismo, para obtener la rugosidad del grano se aplica la **ecuación nº 15**, asociada con el diámetro del grano $D75$ expresado en milímetros.

Ecuación 15: Rugosidad del grano.

$$ns = \frac{D75^{1/6}}{66.9} \text{ con } D75 \text{ expresado en milímetros}$$

Donde:

ns = Rugosidad del grano.

$D75$ = Diámetro del grano (mm). Corresponde con el 75% en peso de la muestra que tiene un diámetro menor a éste.

Estimación del cortante máximo del flujo en el lecho y en el talud ($\tau_{\text{máx}}$)

Una vez hallado el cortante medio, se procede a calcular el cortante máximo en el lecho y en el talud a través de unas curvas de mayoración (ver **figura 21**). Estas curvas relacionan la anchura de la superficie libre y el calado (B/D) con la pendiente del talud (Z) dando un factor K (menor siempre que 1) que multiplica al cortante medio.

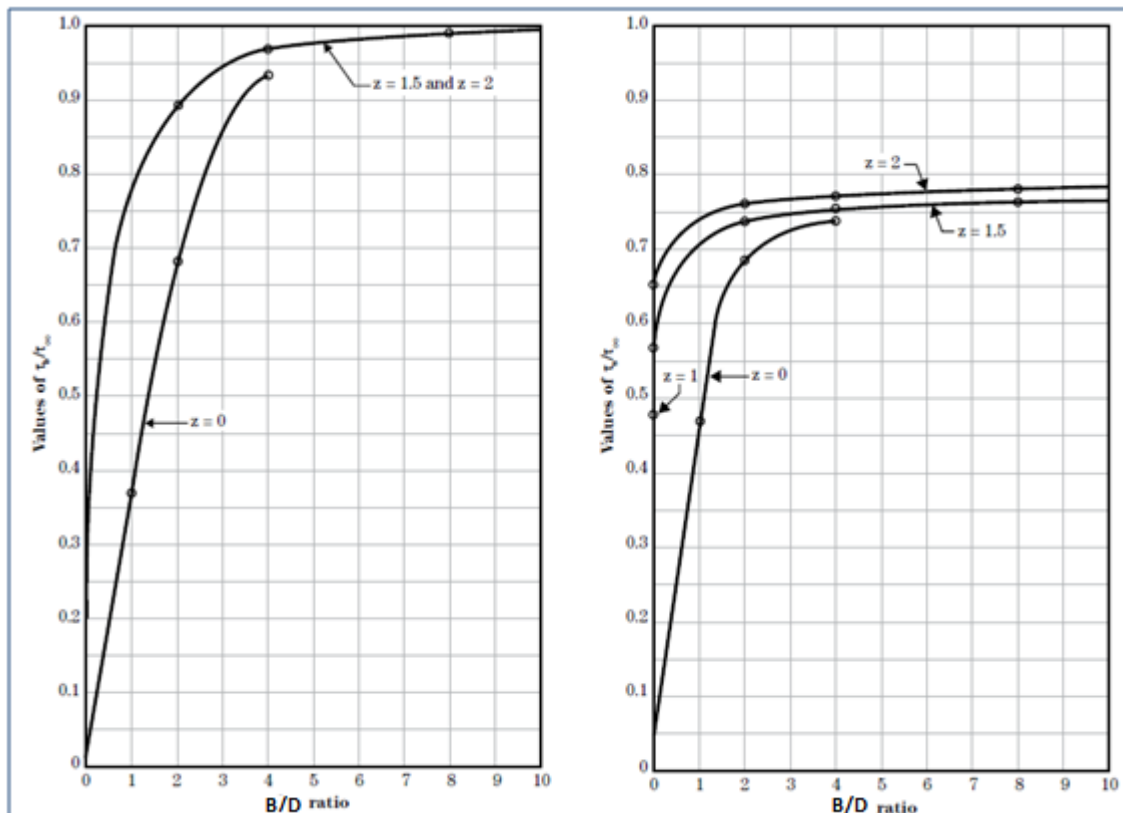


Figura 21: Ábaco para obtener los coeficientes en el lecho (izquierda) y en el talud (derecha) correspondiente al método nº 2 de estimación del cortante del flujo. Fuente: (USDA, 2007).

Estimación del coeficiente de mayoración por curva (K curva)

El cortante de flujo de un determinado tramo fluvial puede verse influenciado según su morfología y, específicamente, en las curvas. Por lo tanto, si el tramo de estudio está en curva, se empleará el factor por curvatura en la margen externa de dicho tramo.

El factor por curva (K curva) además de la longitud aguas abajo de la curva dónde el cortante del flujo sigue viéndose modificado por la curvatura se expresan mediante dos ábacos que se muestran a continuación en la **figura 22**.

El ábaco de la izquierda corresponde con el coeficiente por curvatura (K curva) y relaciona el radio de curvatura (R_c) con la anchura de la superficie libre (B).

El ábaco de la derecha corresponde con la longitud aguas abajo de la curva dónde el cortante del flujo sigue siendo mayor y se relaciona con la longitud de la curva (L_c) y la anchura de la superficie libre (B).

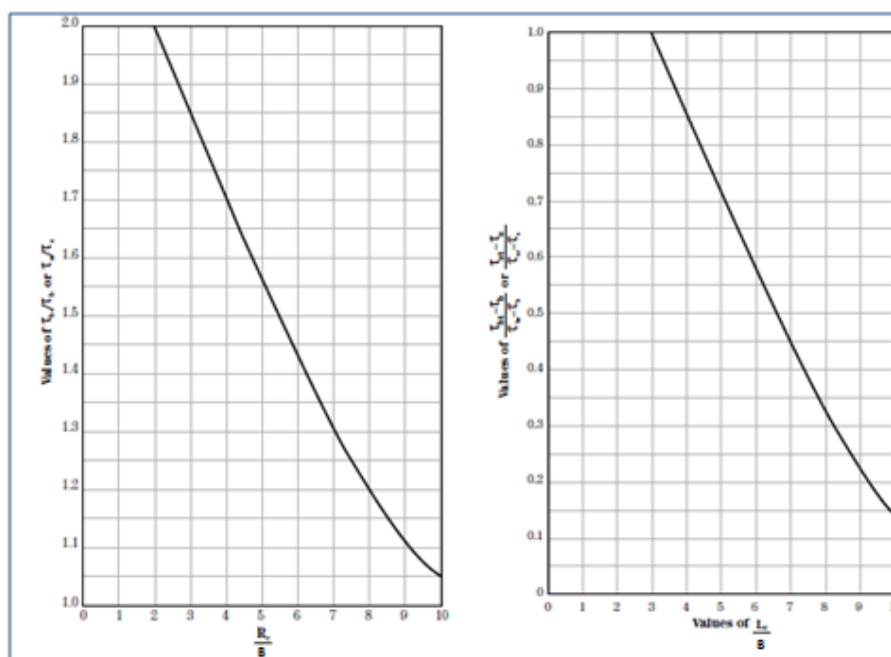


Figura 22: Ábaco para obtener los coeficientes de mayoración en curva (izquierda) y la longitud de protección aguas abajo de la curva (derecha) correspondiente al método nº 2. Fuente: (USDA, 2007).

Limitaciones

Con la presentación del segundo método, las limitaciones que han surgido simplemente con la observación de las fórmulas y el procedimiento de cálculo son las siguientes:

1. Para la utilización de este segundo método habría que estimar el diámetro D75 de los materiales del suelo de cada tramo, por lo que puede existir dificultades si en el lecho y/o talud, la superficie presenta vegetación u otros materiales a los que no se pueda asignar un D75 además del trabajo que supone el muestreo granulométrico.
2. Existe un mayor número de fórmulas y parámetros que en el anterior método, por lo que su sistematización para cauces naturales puede tener también una mayor complicación.
3. Como en el primer método, el **método nº 2** se ha realizado únicamente teniendo en cuenta una sección trapezoidal de un canal artificial, por lo que limita bastante la sistematización para aplicarlo en cauces naturales.
4. Se necesitan las gráficas para calcular el coeficiente de mayoración en el lecho y para cada talud y en curva, por lo que no se pueden sistematizar los cálculos y, por consiguiente, no se puede utilizar dicho método.

Método nº 3: Lane, E. W. 1952.

El **método nº 3** de estudio fue elaborado en el año 1952 por el científico Lane, quien desarrollo un enfoque de diseño analítico para el cálculo del cortante de flujo y su distribución en canales trapezoidales. Dicha metodología de cálculo para la estimación de los esfuerzos cortantes queda expuesta en el libro *“Stream Restoration Design National Engineering Handbook”* y, en particular, en el capítulo 8 *“Threshold Channel Design”*.

Estimación del cortante medio del flujo (τ)

Como en el método anterior, el cortante medio del flujo se calcula atendiendo a la **ecuación nº4**.

Ecuación 4:

$$\tau = \gamma * Rh * Se$$

Donde:

τ = Cortante medio del flujo (N/m²).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Estimación del cortante máximo del flujo en el lecho (τ máx en lecho)

En este método, Lane (1952) desarrolla una secuencia de cálculos para determinar el cortante de flujo en canales trapezoidales. Así pues, el cortante de flujo en la mitad del canal se puede aproximar a la **ecuación nº 16**. Las unidades correspondientes son N/m².

Ecuación 16: Cortante máximo del flujo en el lecho, Lane (N/m²).

$$\tau \text{ máx en lecho} = \gamma * D * Se$$

Donde:

τ máx en lecho = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Estimación del cortante máximo del flujo en los taludes (τ máx en talud)

Lane (1952) también determina que la fuerza máxima de tracción en los taludes de un canal trapezoidal corresponde con la siguiente la **ecuación nº 17** que se muestra posteriormente.

Ecuación 17: Cortante máximo del flujo en el talud, Lane (N/m^2).

$$\tau \text{ máx en talud} = 0.75 * (\gamma * D * Se)$$

Donde:

τ máx en talud = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m^2).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m^3).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Limitaciones

Con la presentación del tercer método, las limitaciones que han surgido simplemente con la observación de las fórmulas y el procedimiento de cálculo son las siguientes:

1. Como en los casos anteriores, el **método nº 3** se ha realizado únicamente teniendo en cuenta una sección trapezoidal de un canal artificial, por lo que limita bastante la sistematización para aplicarlo en cauces naturales (ver **figura 23**).
2. La morfología de los cauces naturales no se presenta como en un canal trapezoidal, por lo que asumir la fórmula para el cortante máximo del flujo en el talud no sería correcto.

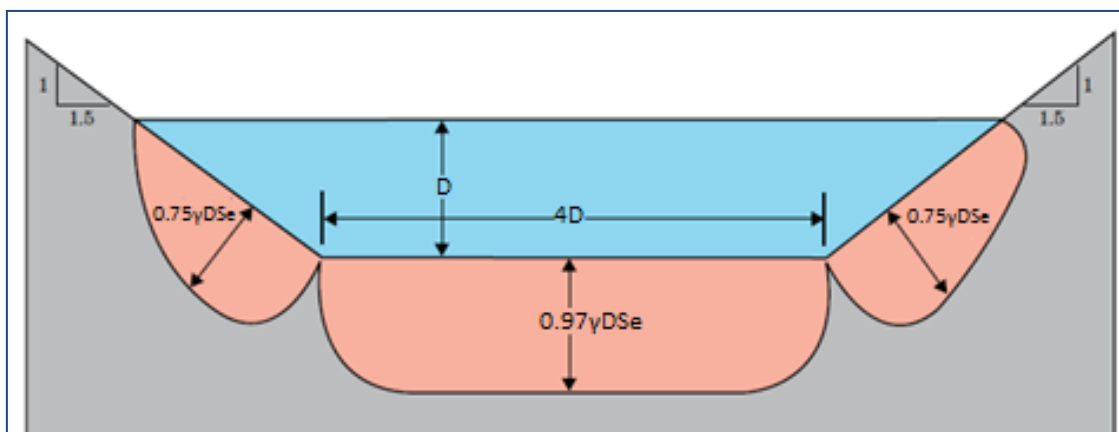


Figura 23: Dimensiones y distribución transversal del cortante de flujo en un canal trapezoidal aplicando la metodología expuesta por Lane. Fuente: USDA, 2007.

Método nº 4: Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*.

El **método nº 4** se ha encontrado en el documento científico "*Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*" publicado en el año 2012. Este documento ha sido escrito por los autores S. Javid y M. Mohammadi y, en él, se describe una nueva secuencia de cálculos para la estimación de los cortante de flujo en canales trapezoidales.

Estimación del cortante del flujo medio (τ)

Como en los casos anteriores, el **método nº 4** asume que el cortante de flujo medio es igual a la **ecuación nº 4**.

Ecuación 4:

$$\tau = \gamma * D * Se$$

Donde:

τ = Cortante medio del flujo (N/m²).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Estimación del cortante del flujo máximo en lecho (τ máx en lecho)

El cortante de flujo máximo en el lecho se representa teniendo en cuenta multitud de coeficientes de corrección además de los parámetros propiamente dichos. A continuación se muestra la **ecuación nº 18** utilizada en el cuarto método.

Ecuación 18: Cortante máximo del flujo en el lecho, Javid,S., & Mohammadi,M. (N/m²).

$$\frac{\tau_{\text{máx en lecho}}}{\gamma * D * Se} = \text{Exp}\left(\mu * \frac{D}{b}\right) - \lambda * \frac{D}{b} * \text{Exp}\left(\mu * \frac{D}{b} * \left[\beta + \delta * \text{Ln}\left(\frac{D}{b}\right)\right]\right)$$

Donde:

τ **máx en lecho** = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

b = Anchura del fondo (m).

$\delta, \mu, \beta, \lambda$ = Coeficientes de corrección.

Los coeficientes de corrección se muestran en las siguientes ecuaciones: **ecuación nº 19** (μ), **ecuación nº 20** (λ), **ecuación nº 21** (β) y **ecuación nº 22** (δ).

Ecuación 19: Coeficiente de corrección μ .

$$\mu = -7.667 + 7.482 \cos(0.0121\theta - 0.235)$$

Donde:

θ = Grado de inclinación del talud (en grados centígrados °).

Ecuación 20: Coeficiente de corrección λ .

$$\lambda = \frac{(-172 + 8.7\theta - 0.093\theta^2)}{100}$$

Donde:

θ = Grado de inclinación del talud (en grados centígrados °).

Ecuación 21: Coeficiente de corrección β .

$$\beta = \frac{(3149 - 86.78\theta + 0.583\theta^2)}{100}$$

Donde:

θ = Grado de inclinación del talud (en grados centígrados °).

Ecuación 22: Coeficiente de corrección δ .

$$\delta = \frac{(996 - 19.52\theta + 0.092\theta^2)}{100}$$

Donde:

θ = Grado de inclinación del talud (en grados centígrados °).

Estimación del cortante del flujo máximo en talud (τ máx en talud)

Una vez conocido el valor del cortante máximo en el lecho, se procede a calcular el cortante de flujo máximo en los taludes a través de la **ecuación nº 23**.

Ecuación 23: Cortante máximo del flujo en el talud, Javid, S., & Mohammadi, M. (N/m^2).

$$\frac{\tau \text{ máx en talud}}{\gamma * D * Se} = \frac{\sqrt{2}}{4} * \left(1 + \frac{b}{D} * \left[1 - \frac{\tau \text{ máx en lecho}}{\gamma * D * Se} \right] \right)$$

Donde:

τ máx en talud = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m^2).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

b = Anchura del fondo (m).



γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m^3).

S_e = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Limitaciones

Una vez estudiado el **método nº 4**, las limitaciones que han surgido con la metodología de cálculo para la estimación de los esfuerzos cortantes han sido las siguientes:

1. Existen excesivos factores de corrección a tener en cuenta a la hora de aplicar la fórmula correspondiente al cortante máximo en el lecho. Asimismo, no se puede precisar si estos coeficientes son adecuados para su utilización en cauces naturales.
2. Como consecuencia de estos factores de corrección, la adecuación a la aplicación informática se hace más tortuosa y menos sencilla. Además, al considerar más parámetros que en otros métodos, como la anchura de fondo, el usuario deberá rellenar más datos que pueden ser obviados.
3. Como en los casos anteriores, el cuarto método sólo estudia el comportamiento de los cortantes del flujo en un canal trapezoidal.
4. El trabajo de estos autores sólo se ha realizado para cuatro tipos de inclinación de los taludes, por lo que no se puede asegurar de que su implantación sirva para cualquier pendiente de dichos taludes y más para cauces naturales.

Método nº 5: T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*.

El **método nº 5** ha sido sacado del “U.S. Department of Transportation” correspondiente al documento “*Design of Roadside Channels with Flexible Linings*” escrito por Roger T. Kilgore and George K. Cotton en septiembre del año 2005.

En esta edición se proporcionan procedimientos de diseño para revestimientos compuestos, curvas y pendientes pronunciadas. Los procedimientos de diseño se basan en el concepto de la fuerza de tracción máxima admisible y se presentan métodos para la determinación de la resistencia al cortante de flujo. La secuencia de cálculos de los distintos cortantes de flujo se verán a continuación.

Estimación del cortante del flujo medio (τ)

Como en los casos anteriores, el **método nº 5** asume que el cortante de flujo medio es igual a la **ecuación nº 4**.

Ecuación 4:

$$\tau = \gamma * Rh * Se$$

Donde:

τ = Cortante medio del flujo (N/m²).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

El esfuerzo cortante en los canales no se distribuye uniformemente a lo largo del perímetro mojado (USBR, 1951; Olsen y Florey, 1952; Chow, 1959; Anderson, et al., 1970). La tensión de corte es cero en la superficie del agua y alcanza un máximo en la línea central del canal. El máximo para los taludes laterales se produce aproximadamente en el tercio inferior de dicho talud. (T. Kilgore & K. Cotton, 2005).

Estimación del cortante del flujo máximo en lecho (τ máx en lecho)

Para simplificar el proceso de diseño, el esfuerzo cortante máximo en el fondo del canal se toma como se muestra en la **ecuación nº 16**, coincidiendo con el cortante máximo en el lecho del **método nº 3**.

Ecuación 16:

$$\tau_{\text{máx en lecho}} = \gamma * D * Se$$

Donde:

$\tau_{\text{máx en lecho}}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²).

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³).

D = Calado máximo de la sección en cauces (m).

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno.

Estimación del cortante del flujo permisible (τ_p)

Para que un revestimiento o técnica de bioingeniería se considere aceptable, el cortante de flujo permisible debe ser mayor o igual que el cortante a máxima profundidad multiplicado por un factor de seguridad (ver **ecuación nº 24**).

Ecuación 24: Cortante del flujo permisible (N/m²).

$$\tau_p \geq SF * \tau_{\text{máx en lecho}}$$

Donde:

τ_p = Cortante de flujo permisible (N/m²).

SF = Factor de seguridad.

$\tau_{\text{máx en lecho}}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²).

En este método, el factor de seguridad predeterminado y que se considera apropiado en muchos casos es igual a 1,0. Sin embargo, los factores de seguridad 1,0-1,5 pueden ser apropiados, cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Para flujos críticos o supercríticos.
- Para regiones climáticas donde la vegetación pueda ser irregular o tarde en establecerse.
- Cuando existe incertidumbre significativa en cuanto a la aprobación de la gestión del diseño.
- Cuando las consecuencias del fracaso son graves.

Estimación del cortante del flujo máximo en talud ($\tau_{\text{máx en talud}}$)

El esfuerzo de corte se reduce generalmente a los lados del canal en comparación con el fondo del canal. El cortante de flujo máximo en los taludes viene dado por la **ecuación nº 25**.

Ecuación 25: Cortante máximo del flujo en el talud, T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (N/m²).

$$\tau \text{ máx en talud} = K_1 * \tau \text{ máx en lecho}$$

Donde:

$\tau \text{ máx en talud}$ = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m²).

K_1 = Coeficiente que relaciona el cortante de flujo en el lecho y en el talud.

$\tau \text{ máx en lecho}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²).

El valor K_1 depende del tamaño y la forma del canal o cauce. Para canales trapezoidales y triangulares, K_1 se ha desarrollado sobre la base de la obra de Anderson (1970) y aplica la **ecuación nº 26**.

Ecuación 26: Coeficiente que relaciona el cortante del flujo en el lecho y en el talud.

$K_1 = 0.77$	$Z \leq 1.5$
$K_1 = 0.066Z + 0.67$	$1.5 < Z < 5$
$K_1 = 1.0$	$5 \leq Z$

Donde:

z = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H).

K_1 = Coeficiente que relaciona el cortante de flujo en el lecho y en el talud.

Estimación del coeficiente de mayoración por curva (K curva)

Como se ha visto anteriormente, el cortante de flujo de un determinado tramo fluvial puede verse influenciado en las curvas. Por lo tanto, si el tramo de estudio está en curva, se empleará el factor de mayoración por curvatura en la margen externa de dicho tramo a través de la **ecuación nº 27**.

Ecuación 27: Cortante del flujo en curva, T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (N/m²).

$$\tau_b = K \text{ curva} * \tau \text{ máx en lecho}$$

Donde:

$\tau \text{ curva}$ = Cortante de flujo como consecuencia de un tramo en curva (N/m²).

$K \text{ curva}$ = Coeficiente que relaciona el cortante de flujo con la curvatura

$\tau \text{ máx en lecho}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²).

El factor K curva puede determinarse a partir de la **ecuación nº 28**, de Young (1996) adaptada de Lane (1955).

Ecuación 28: Coeficiente que relaciona el cortante del flujo con la curvatura.

$$K_{\text{curva}} = 2$$

$$\frac{Rc}{B} \leq 2$$

$$K_{\text{curva}} = 2.38 - 0.206 * \left(\frac{Rc}{B}\right) + 0.0073 * \left(\frac{Rc}{B}\right)^2$$

$$2 < \frac{Rc}{B} < 10$$

$$K_{\text{curva}} = 1.05$$

$$10 \leq \frac{Rc}{B}$$

Donde:

Rc = Radio de curvatura (m).

B = Anchura de la superficie libre (m).

Además, el estrés añadido inducido por curvas no se atenúa por completo hasta alcanzar una cierta distancia aguas abajo de la curva. Si se necesita protección de revestimiento con el fin de resistir los cortantes del flujo, esta protección debe continuar aguas abajo una longitud dada por la **ecuación nº 29**.

Ecuación 29: Longitud de protección (m).

$$Lp = \alpha * \left(\frac{Rh^{\frac{7}{6}}}{n} \right)$$

Donde:

Lp = Longitud de protección (m).

Rh = Radio hidráulico (m) = Sm (superficie mojada) / Pm (perímetro mojado).

α = Constante de conversión de unidades, 0,74 (SI) y 0,60 (CU).

n = Coeficiente de Manning para el lecho.

Una consideración final para el diseño de canal en las curvas es el aumento de la elevación de la superficie del agua en el exterior de la curva causada por el peralte de la superficie del agua. En estos casos, sería necesario incorporar una sobre-elevación adicional en las curvas y que se calcula a través de la **ecuación nº 30**.

Ecuación 30: Sobre-elevación adicional debido al peralte (m).

$$\Delta d = \frac{V^2 * B}{g * Rc}$$

Donde:

Δd = sobre-elevación adicional debido al peralte (m).

V = velocidad media del flujo (m/s).

B = Anchura de la superficie libre (m).

g = Aceleración debido a la gravedad (m/s²).

Rc = Radio de curvatura (m).

Limitaciones

Una vez estudiado el **método nº 5**, las limitaciones que han surgido con la metodología de cálculo para la estimación de los esfuerzos cortantes han sido las siguientes:

1. Como en todos los casos anteriores, el estudio para la estimación de los cortantes del flujo se ha realizado para una sección trapezoidal. Este hecho limita en cierta medida su aplicación para cauces naturales al no saber si su ajuste es del todo correcto.

4.7.3. Aplicación en tramos representativos

A continuación, se realiza una breve descripción de los cuatro tramos seleccionados donde se aplicarán los cinco métodos de estimación de cortantes del flujo expuestos anteriormente.

Tramo nº 1

En la **figura 24** y la **figura 25** se observa el primer tramo fluvial (en planta y en tres dimensiones) para el estudio de la metodología de cálculo acerca de los cortantes del flujo. Este tramo ha sido sacado de los ejemplos descargables con la aplicación HEC-RAS y cuenta con una geometría correspondiente al río “Spring creek” y su afluente el río “Spruce creek”. En el posterior estudio se utilizará una sección transversal perteneciente al río “Spring creek”.

En cuanto a los principales datos pertenecientes al tramo de estudio:

- **Longitud del tramo:** 317 m.
- **Pendiente media del tramo:** 0.09 %.
- **Caudal modelizado:** 84,95 m³/s.

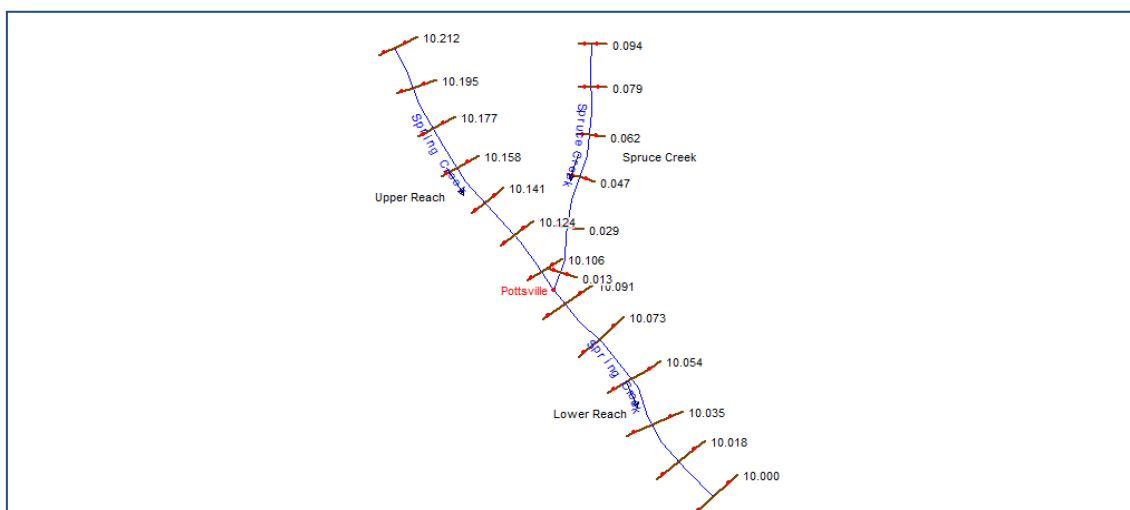


Figura 24: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.

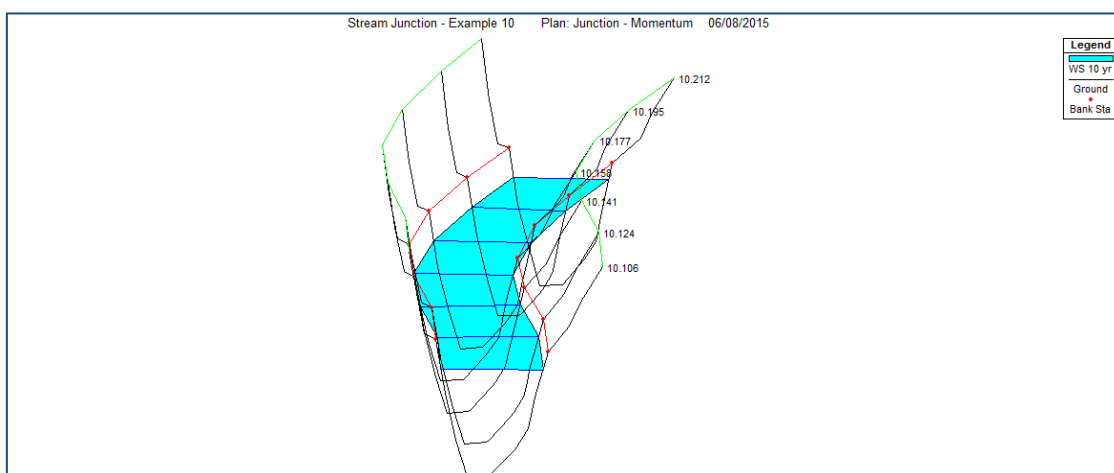


Figura 25: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.

Tramo nº 2

Como en el caso anterior, en la **figura 26** y la **figura 27** se presenta el segundo tramo fluvial obtenido de los ejemplos descargables con la aplicación HEC-RAS. Dicho tramo está compuesto por el río “Spruce creek” que se bifurca en otro río que recibe el nombre de “Bear run” y que finalmente vuelve al río principal como afluente. En el posterior estudio se utilizará una sección transversal del río “Bear run”.

En cuanto a los principales datos pertenecientes al tramo de estudio:

- **Longitud del tramo:** 437,5 m.
- **Pendiente media del tramo:** 0,09 %.
- **Caudal modelizado:** 4,13 m³/s.

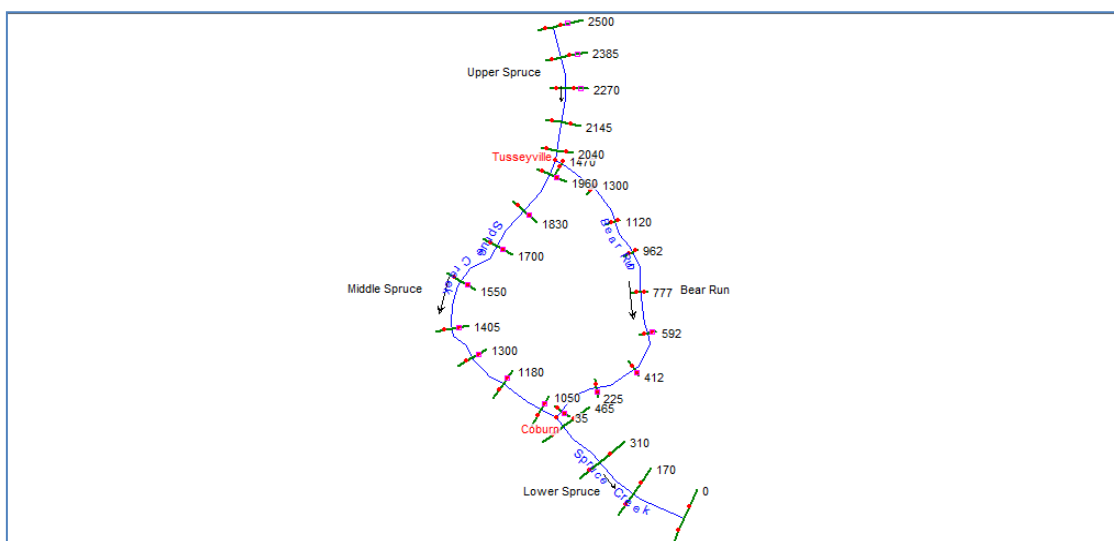


Figura 26: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.

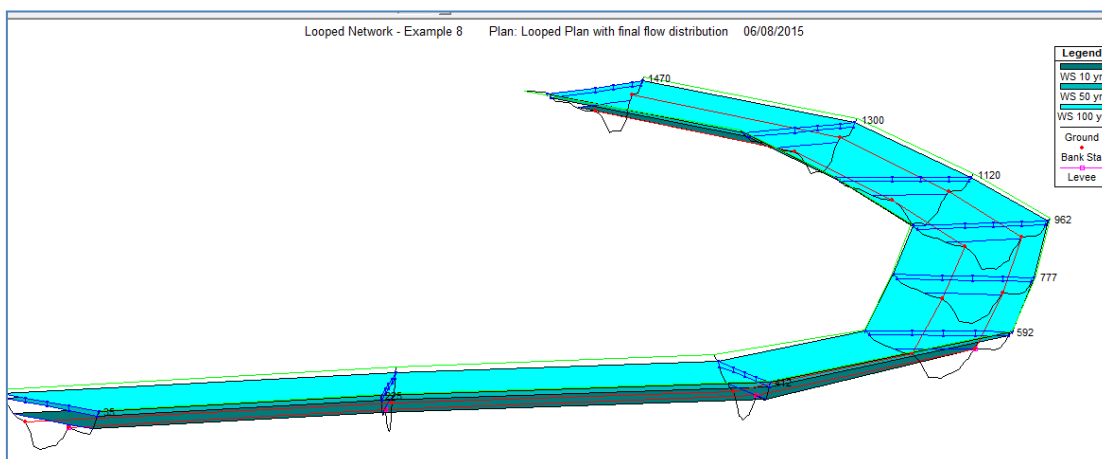


Figura 27: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.

Tramo nº 3

El **tramo nº 3** ha sido obtenido a través de los datos geométricos aportados por los tutores del presente proyecto y se encuentra en el río Tajo, concretamente en la zona de Fuente la Teja perteneciente a la comunidad autónoma de Madrid. En la **figura 28** y la **figura 29** se presenta la geometría del tramo en planta y en tres dimensiones.

En cuanto a los principales datos pertenecientes al tramo de estudio:

- **Longitud del tramo:** 1324,4 m.
- **Pendiente media del tramo:** 0,39 %.
- **Caudal modelizado:** 80 m³/s.

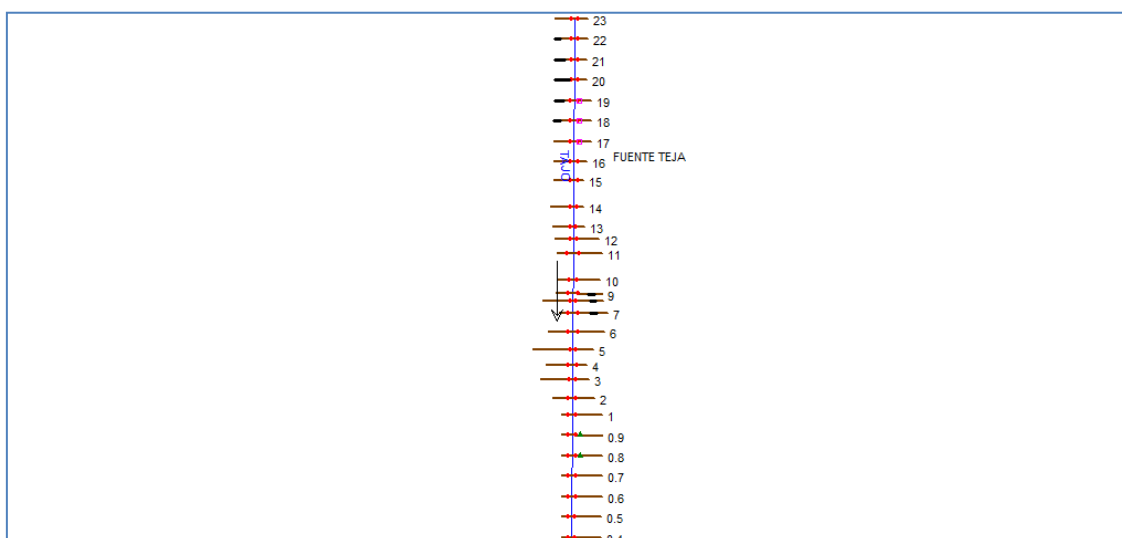


Figura 28: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.

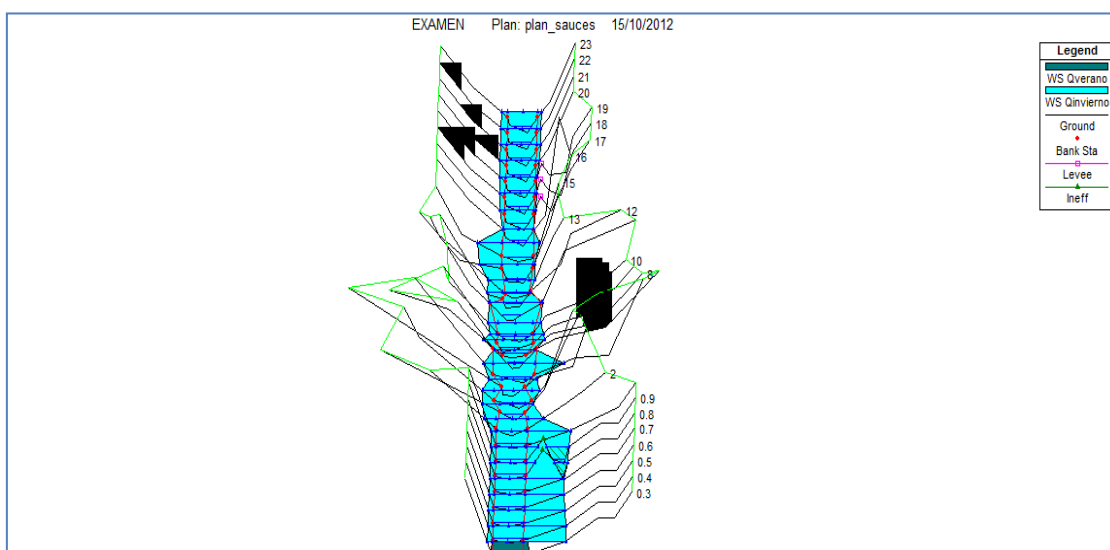


Figura 29: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.

Tramo nº 4

Como en los tres últimos casos, en la **figura 30** y la **figura 31** se presenta el cuarto tramo fluvial obtenido de los ejemplos descargables con la aplicación HEC-RAS. Dicho tramo está compuesto por el río “Critical creek” del cual se utilizará una determinada sección transversal para el posterior estudio de la metodología de cálculo del cortante de flujo.

En cuanto a los principales datos pertenecientes al tramo de estudio:

- **Longitud del tramo:** 1.728,5 m.
- **Pendiente media del tramo:** 0,99%.
- **Caudal modelizado:** 254,85 m³/s.

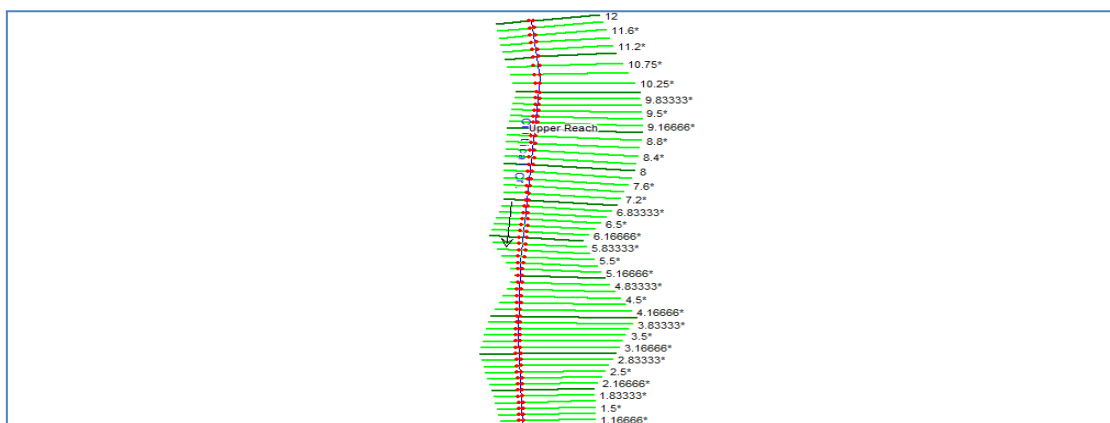


Figura 30: Geometría en planta correspondiente al tramo fluvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.

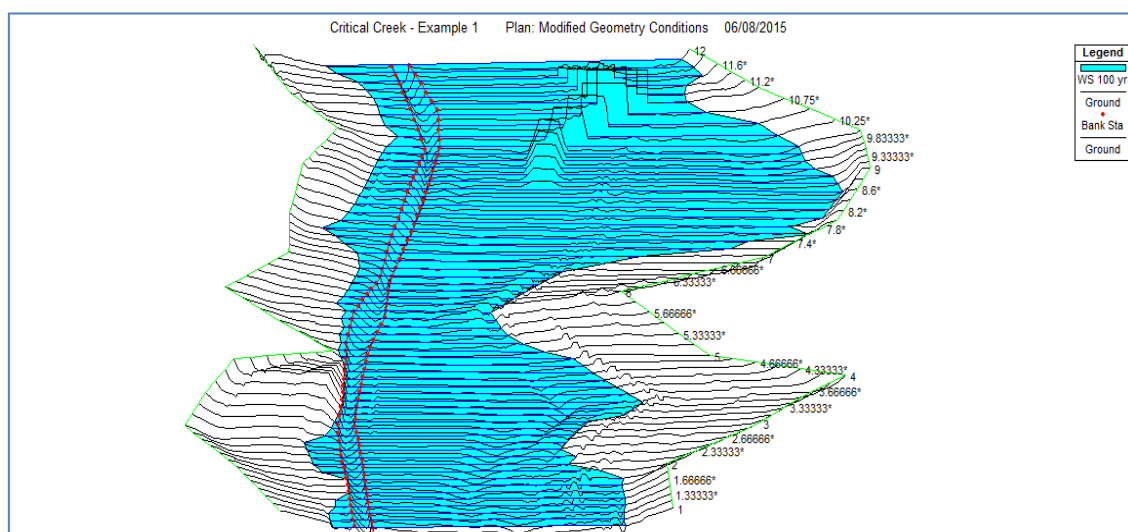


Figura 31: Geometría 3D correspondiente al tramo fluvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.

4.7.4. Aplicación y resultados

Los datos de partida necesarios para el estudio de los cortantes de flujo han sido obtenidos del programa informático HEC-RAS, el cual ofrece todos aquellos parámetros para la estimación de dichos esfuerzos cortantes. Por norma general, el estudio y la comparación de las cinco metodologías de cálculo van a utilizar los siguientes parámetros: estaciones (x), cotas (y), cota de lámina de agua (CLA), pendiente de la línea de energía (Se), perímetro mojado (P), superficie mojada (Sm), anchura de la superficie libre (B), n de Manning (n)...

Por otro lado, a través de la obtención de los anteriores parámetros en HEC-RAS, se van a calcular los siguientes datos (entre otros): distribución de calados (D_i), radio de curvatura (R_c), radio hidráulico (R_h), componente horizontal de inclinación del talud (Z)...

Para concluir, una vez reunidos todos los parámetros necesarios para el estudio y la comparación de los métodos se calcula el cortante medio del flujo, el cortante máximo del flujo en el lecho y en el talud. Asimismo, se procederá a calcular la distribución de cortantes de flujo a lo largo de la sección transversal que se reflejarán en una misma gráfica conjunta y para cada método en concreto.

Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 1 "Spring creek"

Datos de partida de una sección transversal correspondiente al tramo nº 1 "Spring creek"

Antes de empezar con el estudio particular de los cortantes del flujo para cada método se presentan, a modo de figuras ilustrativas adquiridas directamente del programa informático HEC-RAS, los datos de partida del **tramo nº1** perteneciente al río "Spring creek" que van a ser comunes para el cálculo de dichos parámetros.

En primer lugar, se muestra la geometría de una sección transversal representativa del **tramo nº 1** con sus coordenadas x (estaciones) e y (cotas) además de los valores de la n de Manning y los puntos dónde HEC-RAS representa el inicio del talud y el final del lecho (ver **figura 32**).

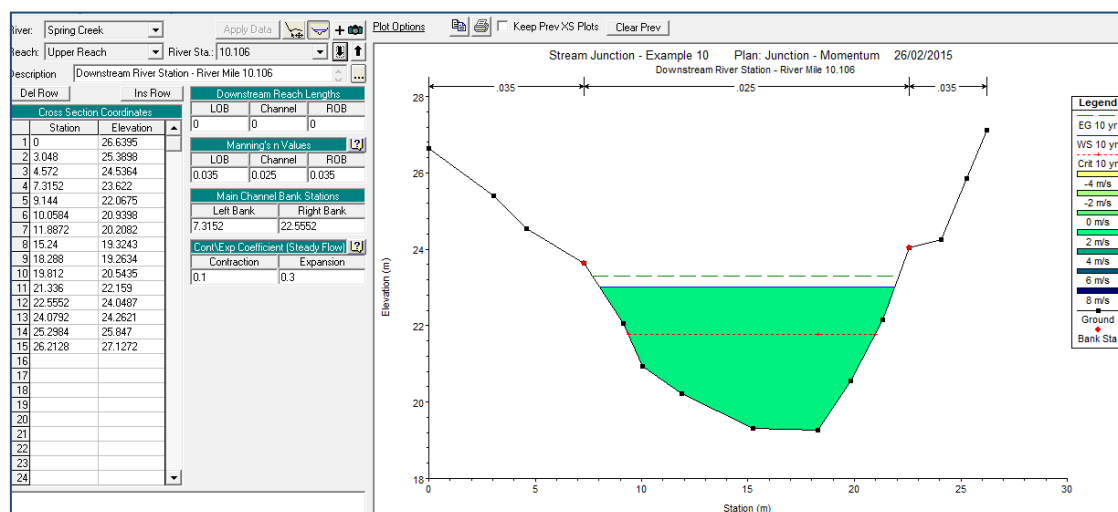


Figura 32: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 1. Fuente: HEC-RAS.

En segundo lugar, en la **figura 33** se muestra para esa misma sección transversal las características hidráulicas y geométricas simuladas por HEC-RAS, es decir, los parámetros que se van a utilizar para la posterior estimación de los cortantes del flujo.

Además, un punto clave para considerar corresponde con que en este primer tramo la modelización ha sido realizada utilizando un caudal total (Q) con un valor de 84,95 m³/s para un periodo de retorno de 10 años.

Plan: Momentum Spring Creek Upper Reach RS: 10.106 Profile: 10 yr					
E.G. Elev (m)	23.30	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.28	W/t. n-Val.		0.025	
W.S. Elev (m)	23.01	Reach Len. (m)	24.38	24.38	24.38
Crit W.S. (m)	21.77	Flow Area (m2)		36.10	
E.G. Slope (m/m)	0.001231	Area (m2)		36.10	
Q Total (m3/s)	84.95	Flow (m3/s)		84.95	
Top Width (m)	13.86	Top Width (m)		13.86	
Vel Total (m/s)	2.35	Avg. Vel. (m/s)		2.35	
Max Chl Dpth (m)	3.75	Hydr. Depth (m)		2.61	
Conv. Total (m3/s)	2421.5	Conv. (m3/s)		2421.5	
Length Wtd. (m)	24.38	Wetted Per. (m)		16.63	
Min Ch El (m)	19.26	Shear (N/m2)		26.21	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	1255.01	0.00	0.00
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)		1.07	
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)			

Figura 33: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fuvial nº 1.
Fuente: HEC-RAS.

La pendiente media de los taludes utilizando la componente horizontal de inclinación Z, una vez calculada, ha resultado ser:

- Z en el talud izquierdo = 1.
- Z en el talud derecho = 1.

Método nº 1: Mays, 1999. Hydraulic Design Handbook

Una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 1** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión. En ambos gráficos se refleja, para la sección transversal seleccionada, el cortante máximo en el lecho así como el cortante máximo en los taludes y su distribución a lo largo de dicha sección según las distintas opciones de distribución explicadas anteriormente en el apartado **4.6.3. Criterios para la generalización del resultado a cauces naturales**.

Una consideración a tener en cuenta es que, en el gráfico de barras y en el gráfico de dispersión, aparecen dos colores. Por un lado, el color más oscuro corresponde con los resultados obtenidos utilizando la **opción A (τ)** de distribución del cortante del flujo. Por otro lado, el color más claro corresponde con los resultados obtenidos utilizando la **opción B (τ^*)**.

A continuación, en la **figura 34** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 1** y sus valores a través del gráfico de barras.

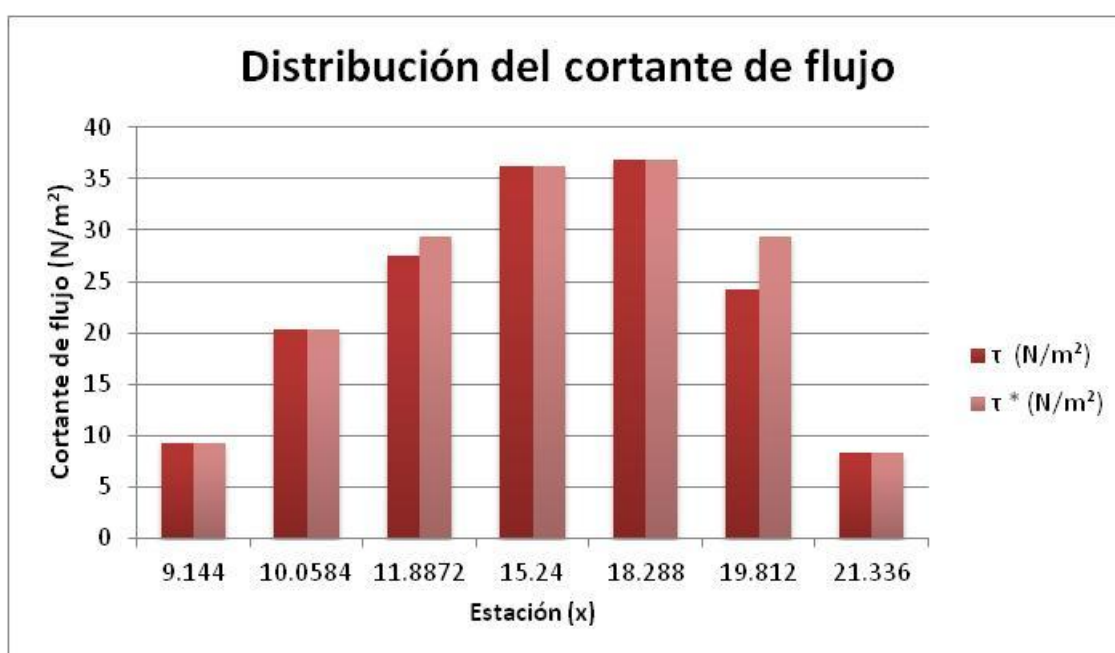


Figura 34: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 35** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

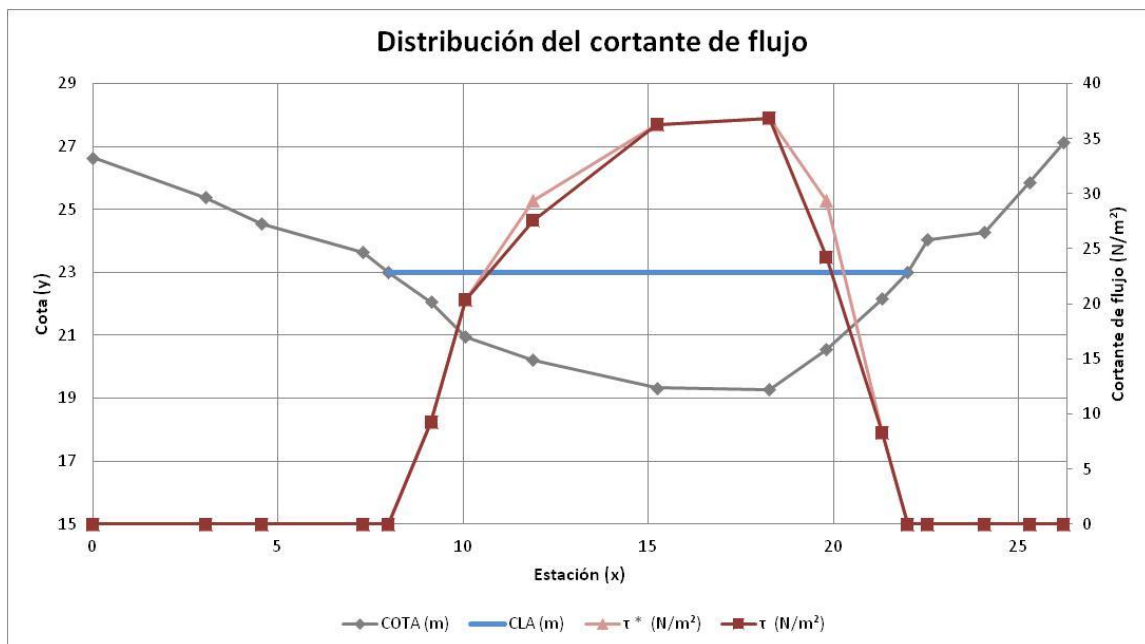


Figura 35: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en el lecho de la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.

Método nº 2: United States Department of Agricultura (USDA), 2007. Stream Restoration Design National Engineering Handbook

Como en el caso anterior, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 2** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión..

Para la estimación de este método se han utilizado y calculado los siguientes parámetros:

- Cortante de flujo de referencia (τ_{∞}), en $N/m^2 = 44,20$.
- Rugosidad del grano (ns) = 0,025.
- Diámetro del grano (**D75**), en mm = 20.
- Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho (n) = 0,025.

A continuación, en la **figura 36** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 1** y sus valores a través del gráfico de barras.

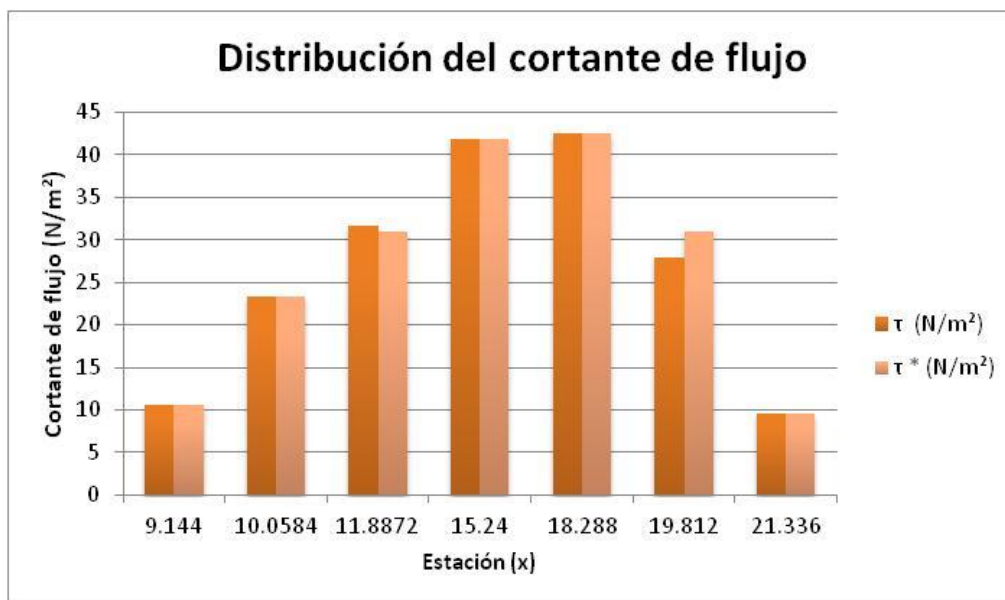


Figura 36: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 2. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 37** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

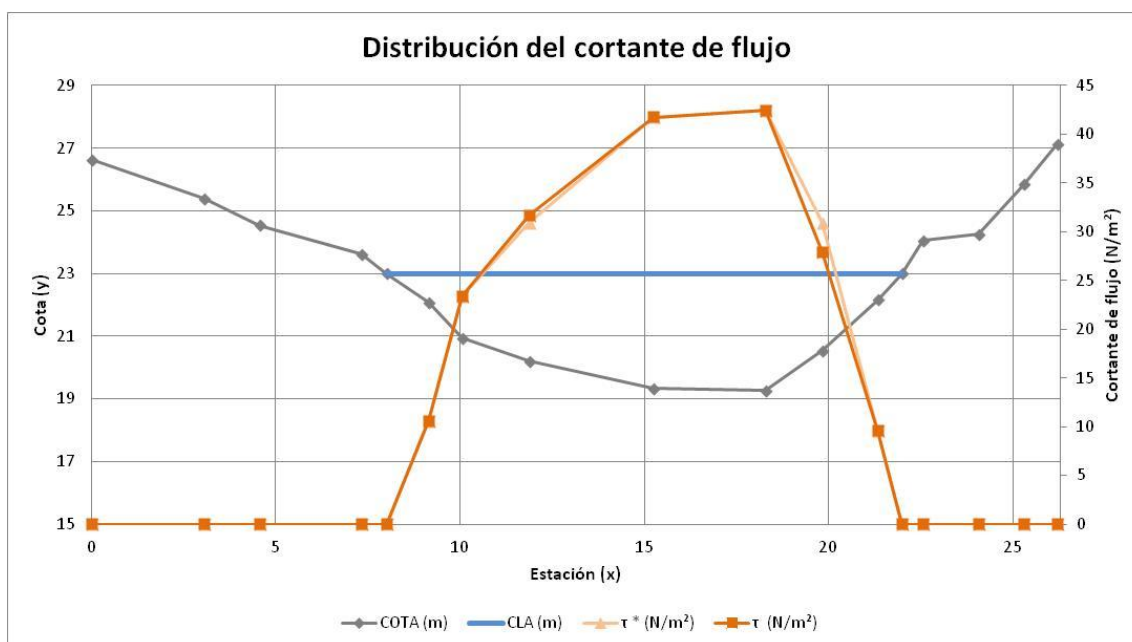


Figura 37: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 2. Fuente: elaboración propia.

Método nº 3: Lane, E. W. 1952

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 3** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 38** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 1** y sus valores a través del gráfico de barras.

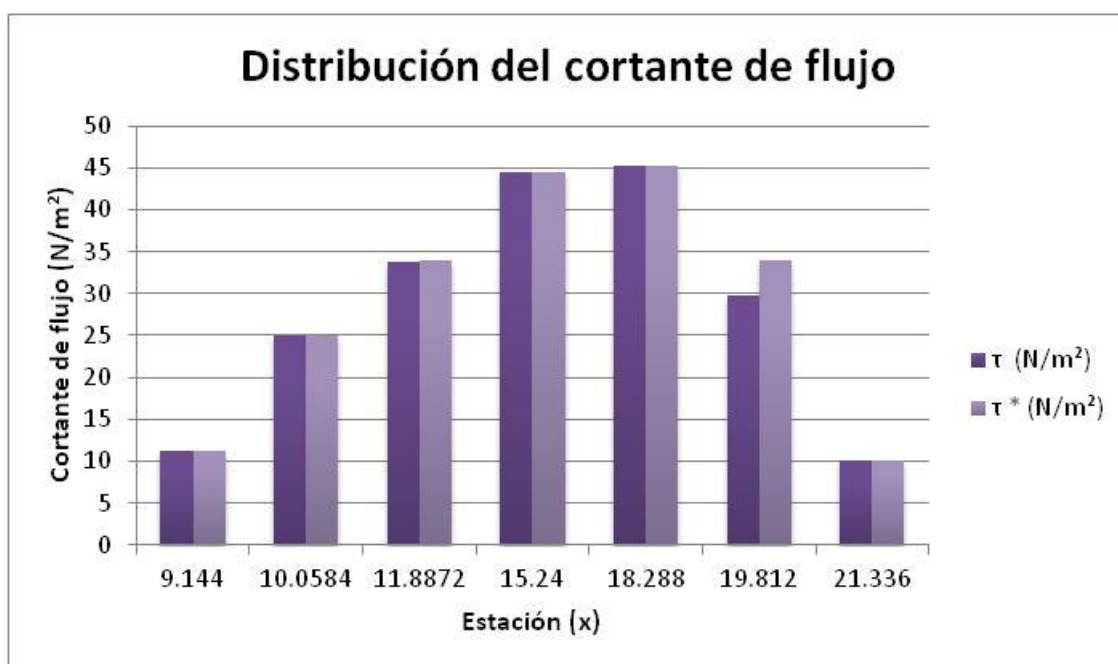


Figura 38: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 39** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

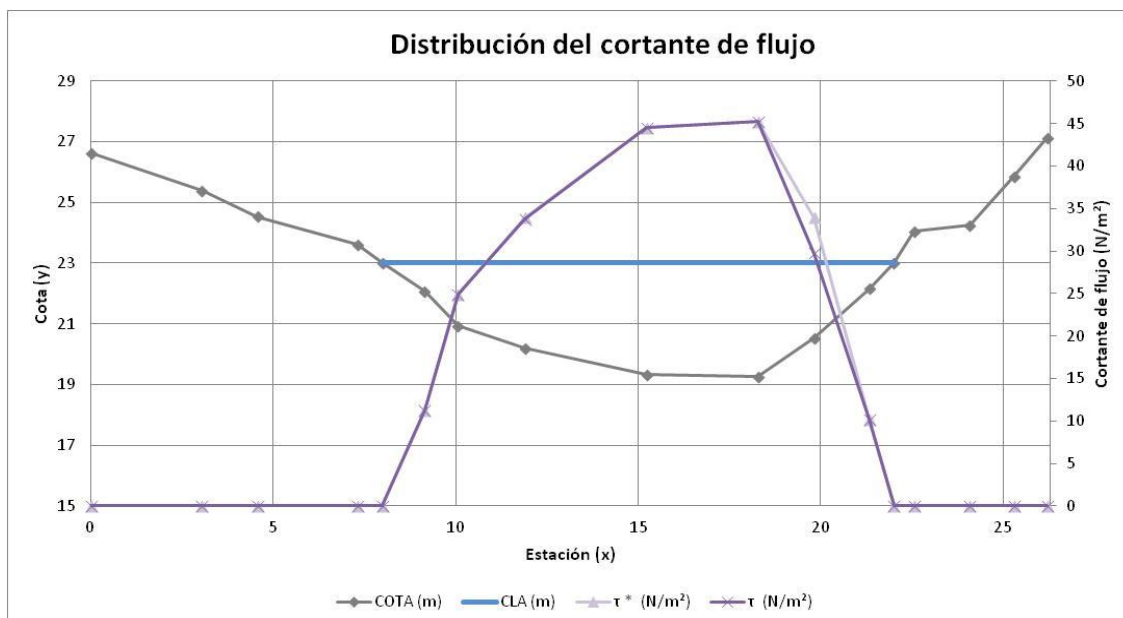


Figura 39: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Método nº 4: Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 4** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 40** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 1** y sus valores a través del gráfico de barras.

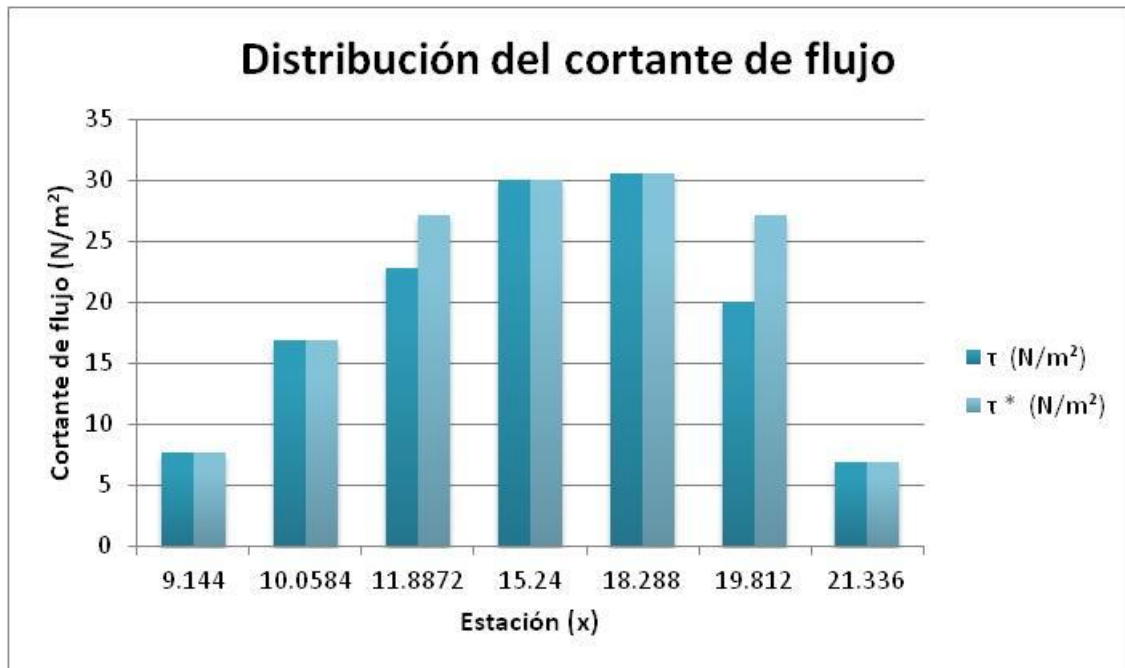


Figura 40: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 41** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

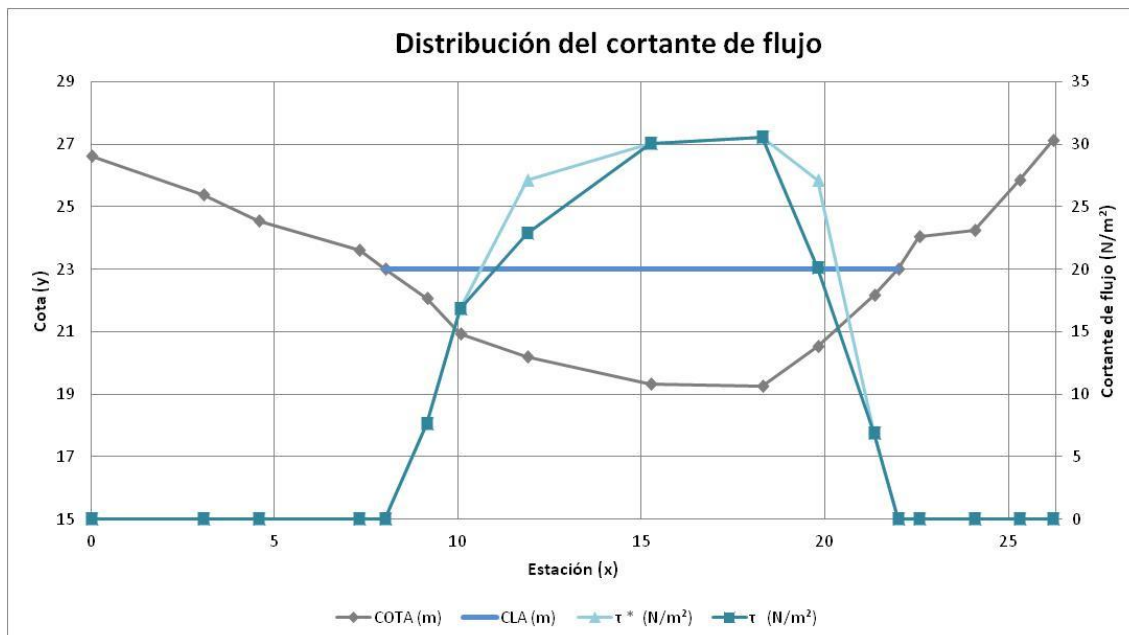


Figura 41: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Método nº 5: T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 5** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 42** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 1** y sus valores a través del gráfico de barras.

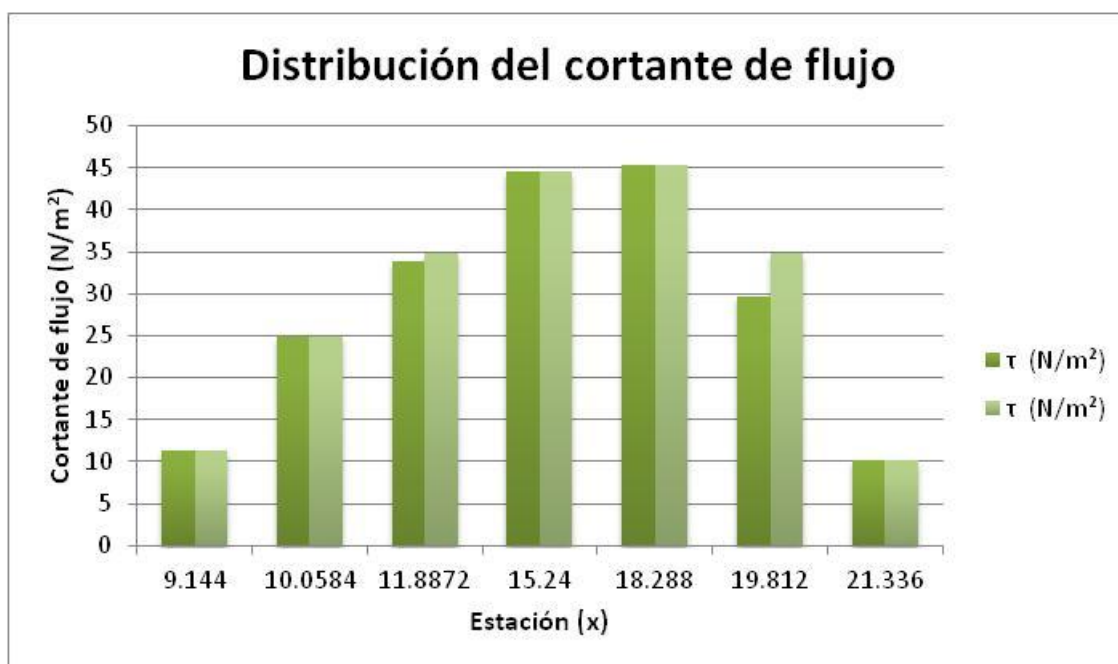


Figura 42: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 5.. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 43** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través del gráfico de dispersión.

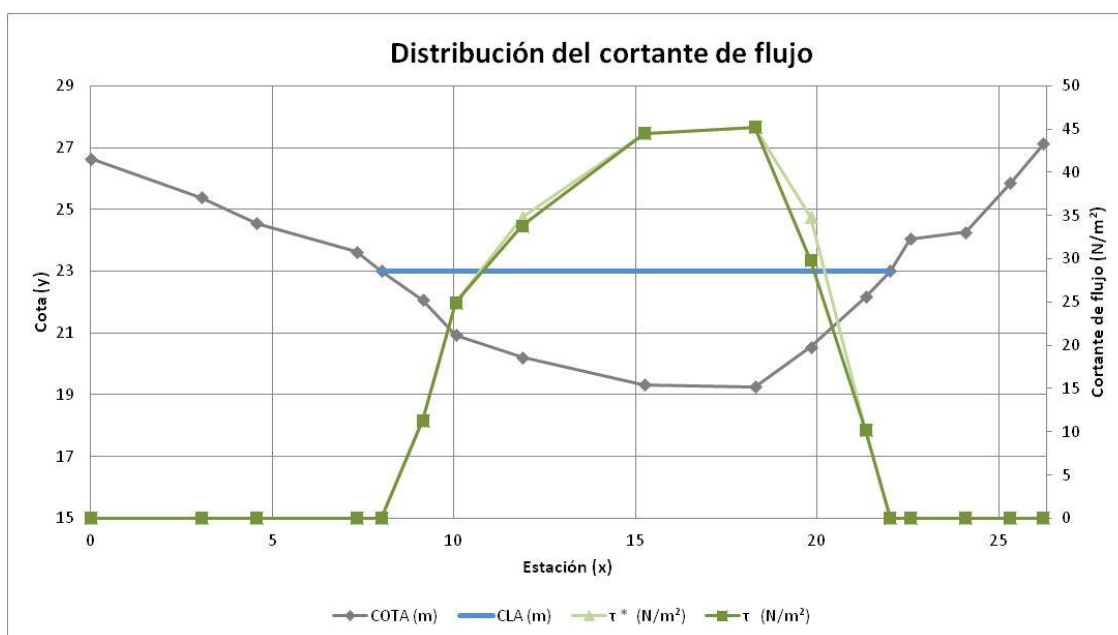


Figura 43: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 1 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Comparación de resultados

Con el propósito de que los anteriores estudios de los cinco métodos puedan observarse más adecuadamente, se ha realizado una comparación que refleja en una tabla los valores del cortante medio en el lecho, del cortante máximo en el lecho y de los cortantes máximos en cada talud para cada método (ver **tabla nº 3**). Además, en esta misma tabla se muestra la media y el coeficiente de variación (**CV**) de las cinco metodologías según los valores de los cortantes del flujo.

	M1	M2	M3	M4	M5	Media	CV
Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	26,72	26,72	26,72	26,72	26,72	26,72	0,00
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	36,88	42,43	45,25	30,60	45,25	40,08	0,16
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	29,39	30,94	33,94	27,16	34,84	31,25	0,10
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	29,39	30,94	33,94	27,16	34,84	31,25	0,10

Tabla 3: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 1. Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de variación se utiliza para hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variables y, en este caso, para conocer como de dispersos se encuentran los resultados obtenidos para los distintos cinco métodos según la media de éstos. A la vista de los resultados expuestos en la anterior **tabla nº 3**, el coeficiente de variación para el cortante máximo del flujo en el lecho supone un 16% de la media y para los cortantes máximos del flujo en ambos taludes un 10% de la media. Por lo tanto, se puede afirmar que los resultados correspondientes a las cinco metodologías en este tramo fluvial no se han alejado apenas de la media y que todas ellas serían válidas para su implementación en la aplicación informática.

Igualmente, se ha creado una tabla más detallada que agrupa las cinco metodologías de cálculo para la misma sección transversal seleccionada del **tramo nº 1**. En dicha tabla aparece la distribución del cortante del flujo considerando los valores más elevados de la comparación de cada distribución por separado de los métodos, es decir, la distribución del color que ha supuesto que los cortantes del flujo sean mayores (ver **tabla nº 4**). Asimismo, en color azul se representan las filas que coinciden con el lecho.

ESTACIÓN (m)	COTA (m)	CLA (m)	τ (N/m ²) M1	τ (N/m ²) M2	τ (N/m ²) M3	τ (N/m ²) M4	τ (N/m ²) M5
0	26.6395	23	0	0	0	0	0
3.048	25.3898	23	0	0	0	0	0
4.572	24.5364	23	0	0	0	0	0
7.3152	23.622	23	0	0	0	0	0
8	23	23	0	0	0	0	0
9.144	22.0675	23	9.20	10.59	11.29	7.64	11.29
10.0584	20.9398	23	20.33	23.39	24.95	16.87	24.95
11.8872	20.2082	23	29.39	30.94	33.94	27.16	34.84
15.24	19.3243	23	36.28	41.74	44.51	30.10	44.51
18.288	19.2634	23	36.88	42.43	45.25	30.60	45.25
19.812	20.5435	23	29.39	30.94	33.94	27.16	34.84
21.336	22.159	23	8.30	9.55	10.18	6.89	10.18
22	23	23	0	0	0	0	0
22.5552	24.0487	23	0	0	0	0	0
24.0792	24.2621	23	0	0	0	0	0
25.2984	25.847	23	0	0	0	0	0
26.2128	27.1272	23	0	0	0	0	0

Tabla 4: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en el lecho para la sección transversal seleccionada del tramo nº 1 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.

Por último, se han agrupado los valores que aparecen en la anterior tabla en una gráfica de dispersión que permite observar de manera más ilustrativa el comportamiento del cortante de flujo a lo largo de la sección transversal del estudio correspondiente al **tramo nº 1** (ver **figura 44**).

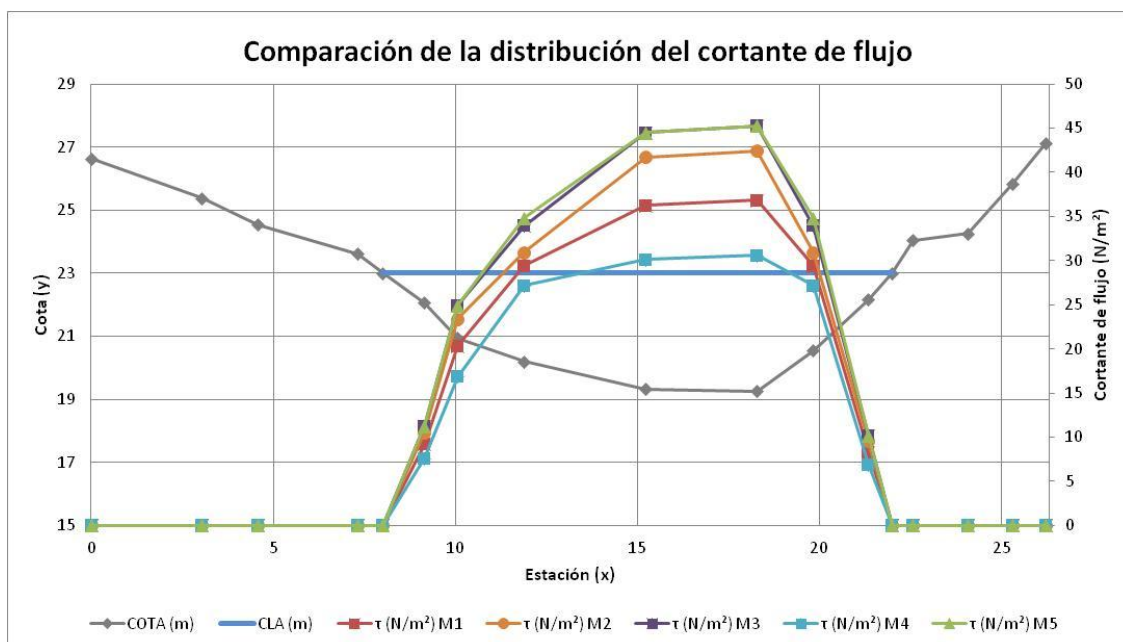


Figura 44: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 1. Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en esta última gráfica (Además de en las dos tablas anteriores), los métodos que presentan una distribución de los valores del cortante de flujo más elevados son el **método nº 3** y el **método nº 5**. Como consecuencia a este hecho, dichos métodos son los más adecuados para la posterior implantación en la aplicación informática que se pretende crear para el presente proyecto ya que, al tener unos valores más altos que los demás métodos, se está más cerca del lado de la seguridad. Por lo tanto, el método más adecuado en este primer tramo de estudio corresponde con el **método nº 5** (verde), mientras que el peor método sería el correspondiente al **método nº 4** (azul).

Para concluir, se va a comparar un método respecto de otro en función del valor del cortante máximo del flujo en el lecho. Para ello se tomará como referencia el máximo valor obtenido y se calcularán los porcentajes (%) que respecto a este valor suponen los restantes.

- **Método nº 5:** cortante de referencia (valor τ máx. en lecho = 45,25 N/m²)
- **Método nº 3:** 100 %.
- **Método nº 2:** 93,8 %.
- **Método nº 1:** 81,50 %.
- **Método nº 4:** 67,6 %.

Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 2 "Bear run"

Datos de partida de una sección transversal correspondiente al tramo nº 2 "Bear run"

Antes de empezar con el estudio particular de los cortantes del flujo para cada método se presentan, a modo de figuras ilustrativas adquiridas directamente del programa informático HEC-RAS, los datos de partida del **tramo nº2** perteneciente al río "Bear run" que van a ser comunes para el cálculo de dichos parámetros.

En primer lugar, en la **figura 45** se muestra la geometría de una sección transversal representativa del **tramo nº 2** con sus coordenadas x (estaciones) e y (cotas) además de los valores de la n de Manning y los puntos dónde HEC-RAS representa el inicio del talud y el final del lecho.

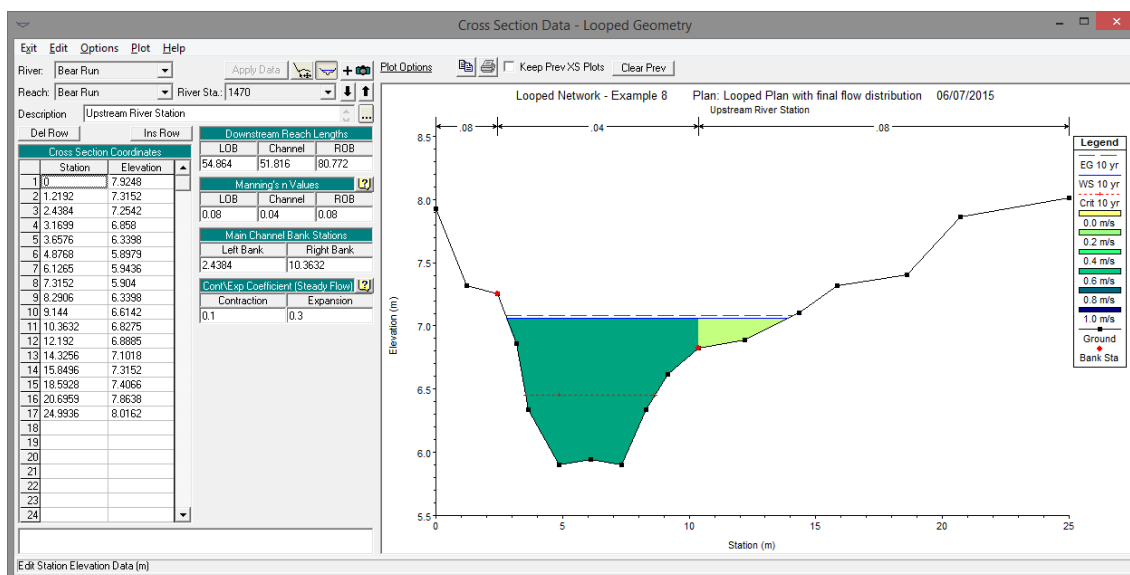


Figura 45: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 2. Fuente: HEC-RAS.

En segundo lugar, en la **figura 46** se muestra para esa misma sección transversal las características hidráulicas y geométricas simuladas por HEC-RAS, es decir, los parámetros que se van a utilizar para la posterior estimación de los cortantes del flujo.

Además, un punto clave para considerar corresponde con que en este segundo tramo la modelización ha sido realizada utilizando un caudal total (Q) con un valor de 4,13 m³/s para un periodo de retorno de 10 años.

Plan: Loop - final Bear Run Bear Run RS: 1470 Profile: 10 yr					
E.G. Elev (m)	7.08	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.02	W/t. n-Val.		0.040	0.080
W.S. Elev (m)	7.06	Reach Len. (m)	54.86	51.82	80.77
Crit W.S. (m)	6.46	Flow Area (m2)		6.02	0.52
E.G. Slope (m/m)	0.001086	Area (m2)		6.02	0.52
Q Total (m3/s)	4.13	Flow (m3/s)		4.07	0.06
Top Width (m)	11.12	Top Width (m)		7.57	3.55
Vel Total (m/s)	0.63	Avg. Vel. (m/s)		0.68	0.11
Max Chl Dpth (m)	1.16	Hydr. Depth (m)		0.80	0.15
Conv. Total (m3/s)	125.4	Conv. (m3/s)		123.6	1.8
Length Wtd. (m)	52.20	Wetted Per. (m)		8.08	3.56
Min Ch El (m)	5.90	Shear (N/m2)		7.94	1.55
Alpha	1.13	Stream Power (N/m s)	1196.64	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.06	Cum Volume (1000 m3)	0.09	3.47	0.25
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	0.68	4.03	1.84

Figura 46: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fluvial nº 2.

Fuente: HEC-RAS.

La pendiente media de los taludes utilizando la componente horizontal de inclinación Z, una vez calculada, ha resultado ser:

- Z en el talud izquierdo = 1.
- Z en el talud derecho = 8.

Método nº 1: Mays, 1999. Hydraulic Design Handbook

Una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 1** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión. En ambos gráficos se refleja, para la sección transversal seleccionada, el cortante máximo en el lecho así como el cortante máximo en los taludes y su distribución a lo largo de dicha sección según las distintas opciones de distribución explicadas anteriormente en el apartado **4.6.3. Criterios para la generalización del resultado a cauces naturales**.

En este tramo, en el gráfico de barras y en el gráfico de dispersión, aparecen tres colores. Por un lado, el color más oscuro corresponde con lo resultados obtenidos utilizando la **opción A (τ)** de distribución del cortante del flujo. Por otro lado, el color más intenso corresponde con los resultados obtenidos utilizando la **opción B (τ^*)**. El último color, en este caso el que tiene el color más claro, corresponde con los resultados obtenidos utilizando la **opción C (τ curva)**.

A continuación, en la **figura 47** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 2** y sus valores a través del gráfico de barras.

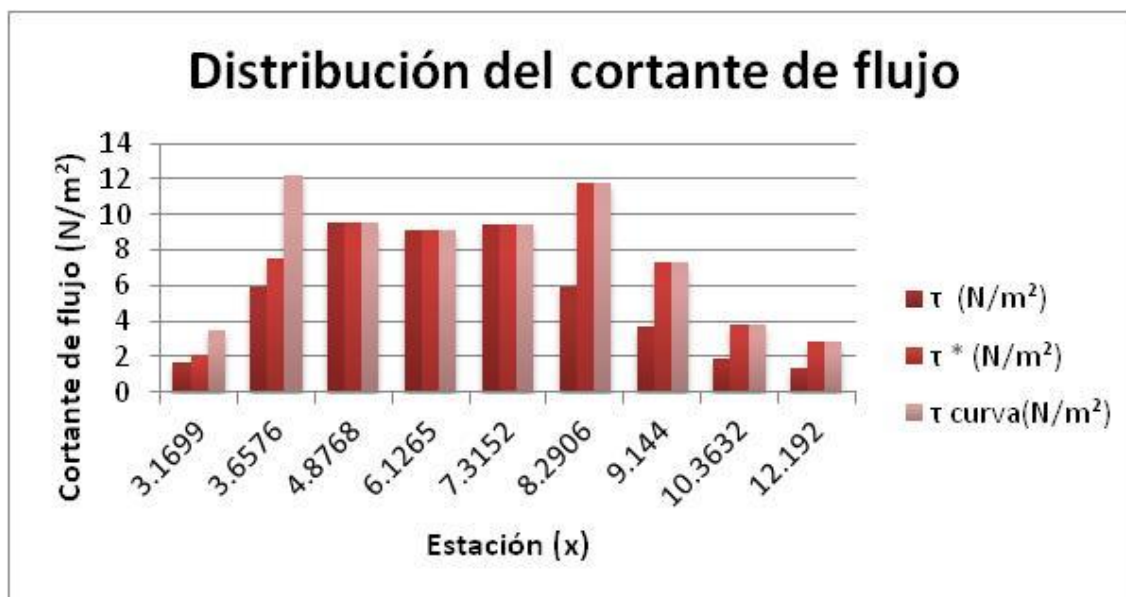


Figura 47: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 48** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

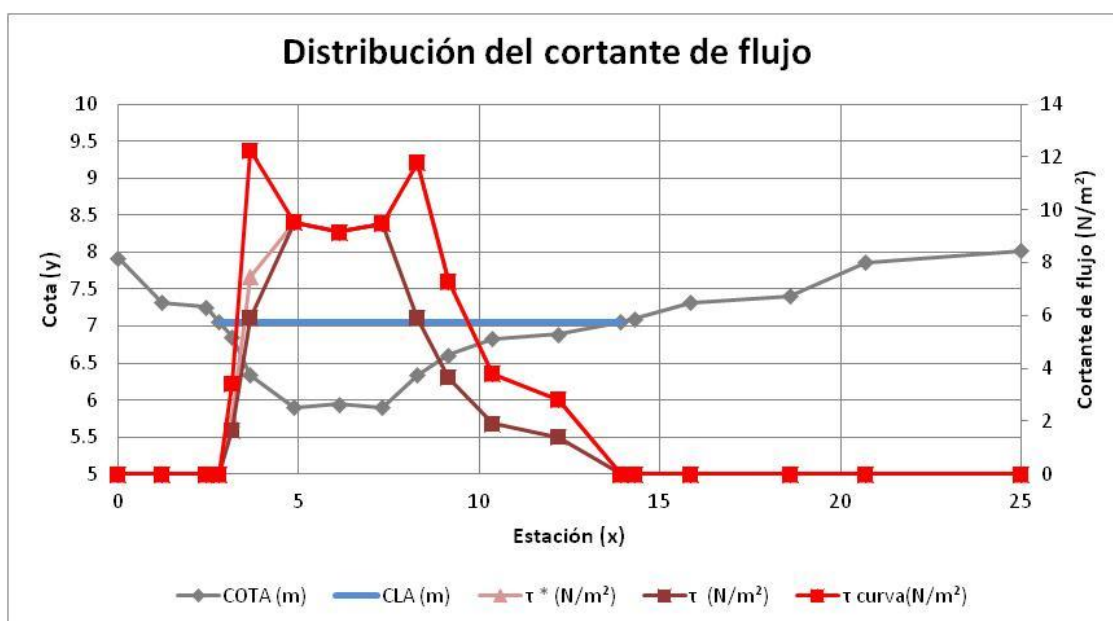


Figura 48: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.



Método nº 2: United States Department of Agricultura (USDA), 2007. Stream Restoration Design National Engineering Handbook

Para la estimación de este método se han utilizado y calculado lo siguientes parámetros:

- Cortante de flujo de referencia (τ_{∞}), en $N/m^2 = 12,25$.
- Rugosidad del grano (n_s) = 0,025.
- Diámetro del grano (**D75**), en mm = 20.
- Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho (**n**) = 0,04.

Sin embargo, no ha podido realizarse el estudio correspondiente a la sección transversal seleccionada del **tramo nº 2** puesto que las gráficas para hallar el cortante máximo en el lecho y el cortante máximo en los taludes no se adecua a las características de dicha sección. Dichas gráficas no cuentan con la componente horizontal de inclinación del talud (Z) que se ajuste a los resultados de esta variable en la sección de estudio del **tramo nº 2** más que para hallar el cortante máximo del flujo en el talud izquierdo (Z = 1).

Método nº 3: Lane, E. W. 1952

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 3** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

En este caso, no aparece la distribución de cortantes teniendo en cuenta que el tramo esta en curva puesto que el método en sí mismo no tiene un procedimiento específico.

A continuación, en la **figura 49** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 2** y sus valores a través del gráfico de barras.

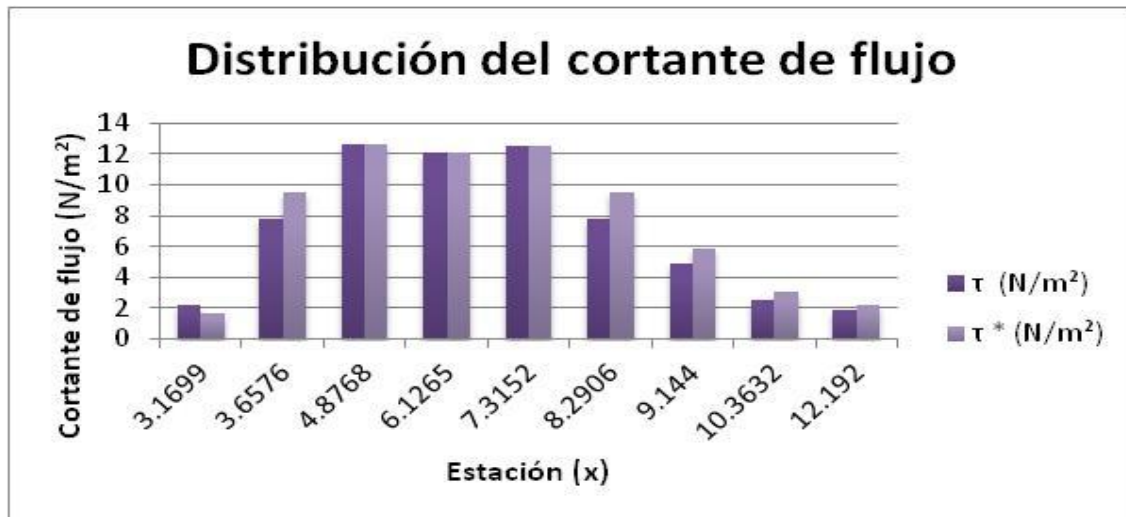


Figura 49: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº3. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 50** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

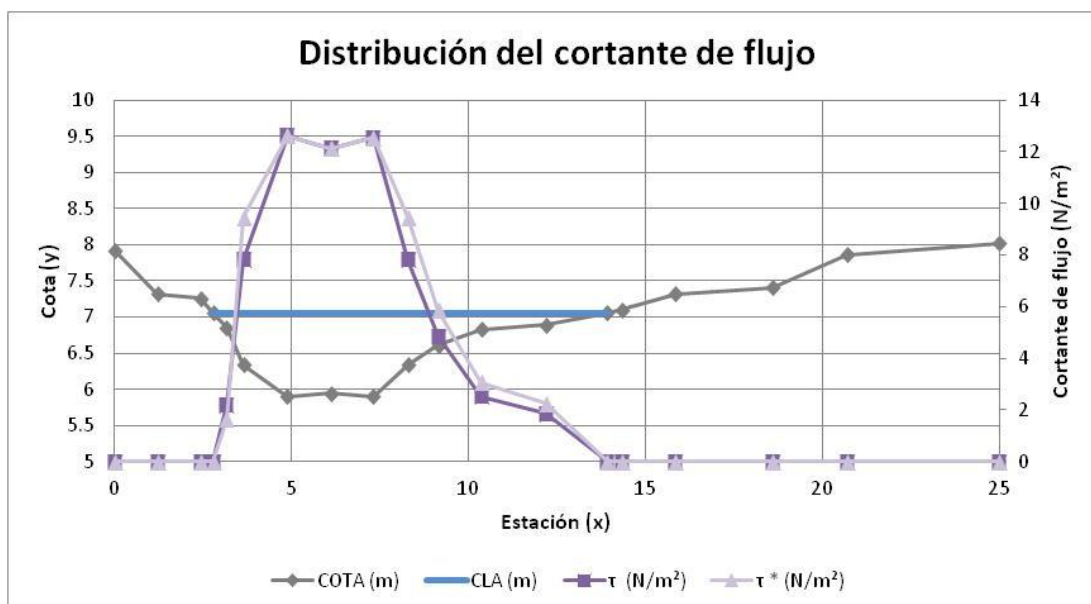


Figura 50: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Método nº 4: Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 4** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

En este caso, no aparece la distribución de cortantes teniendo en cuenta que el tramo esta en curva puesto que el método en sí mismo no tiene un procedimiento específico.

A continuación, en la **figura 51** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 2** y sus valores a través del gráfico de barras.

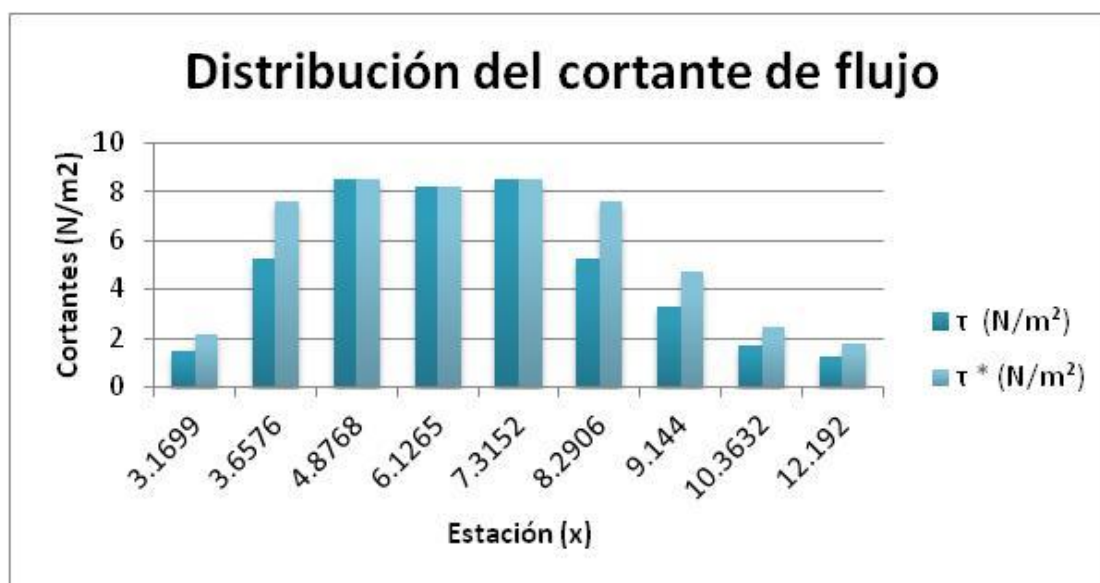


Figura 51: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 52** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

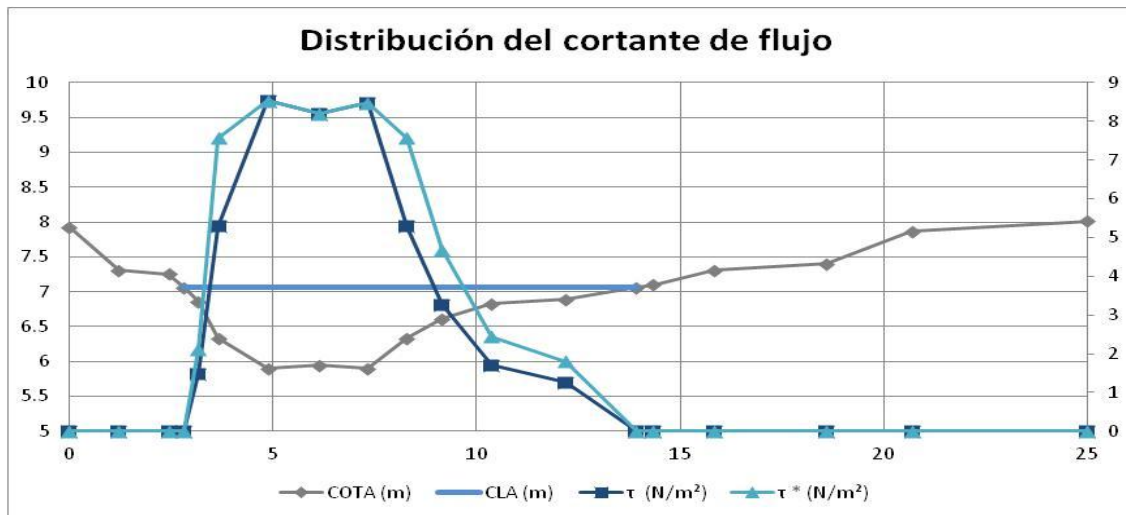


Figura 52: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Método nº 5: T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 5** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 53** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 2** y sus valores a través del gráfico de barras.

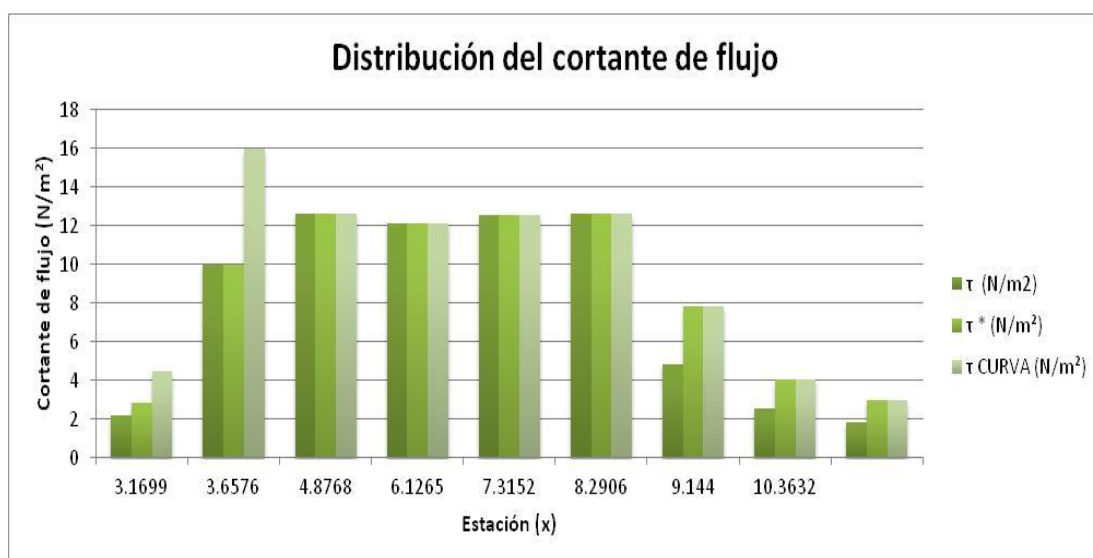


Figura 53: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 54** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

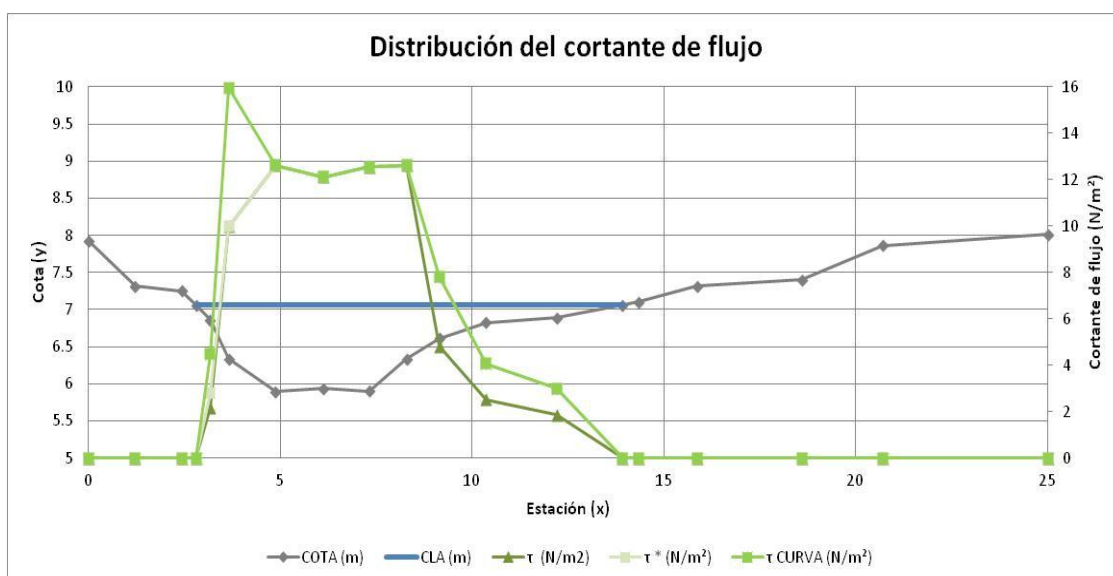


Figura 54: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 2 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Comparación de resultados

Con el propósito de que los anteriores estudios de los cinco métodos puedan observarse más adecuadamente, se ha realizado una comparación que refleja en una tabla los valores del cortante medio en el lecho, del cortante máximo en el lecho y de los cortantes máximos en cada talud para cada método (ver **tabla nº 5**). Además, en esta misma tabla se muestra la media y el coeficiente de variación (**CV**) de las cinco metodologías según los valores de los cortantes del flujo.

	M1	M2	M3	M4	M5	Media	CV
Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	0,00
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	9,53	-	12,62	8,53	12,62	10,85	0,20
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	7,48	-	9,46	7,57	9,98	8,62	0,15
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	11,79	-	9,46	7,57	12,62	10,36	0,22
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo en curva, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	12,25	-	-	-	15,98	14,12	0,19

Tabla 5: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 2. Fuente: elaboración propia.

A la vista de los resultados expuestos en la anterior **tabla nº 5**, el coeficiente de variación para el cortante máximo del flujo en el lecho supone un 20% de la media y para los cortantes máximos del flujo en el talud izquierdo y en el talud derecho, un 15% y un 22% de la media respectivamente. Además, para el cortante máximo del flujo en el talud izquierdo teniendo en cuenta la curvatura, el coeficiente de variación ha resultado ser de un 19% de la media. Por lo tanto, se puede afirmar que los resultados correspondientes a las cinco metodologías en este tramo fluvial no se han alejado apenas de la media y que todas ellas serían válidas para su implementación en la aplicación informática.

Igualmente, se ha creado una tabla más detallada que agrupa las cinco metodologías de cálculo para la misma sección transversal seleccionada del **tramo nº 2**. En dicha tabla aparece la distribución del cortante del flujo considerando los valores más elevados de la comparación de cada distribución por separado de los métodos, es

decir, la distribución del color que ha supuesto que los cortantes del flujo sean mayores (ver **tabla nº 6**). Asimismo, en color azul se representan las filas que coinciden con el lecho.

ESTACIÓN (m)	COTA (m)	CLA (m)	τ (N/m ²) M1	τ (N/m ²) M2	τ (N/m ²) M3	τ (N/m ²) M4	τ (N/m ²) M5
0	7.9248	7.06	0	0	0	0	0
1.2192	7.3152	7.06	0	0	0	0	0
2.4384	7.2542	7.06	0	0	0	0	0
2.8	7.06	7.06	0	0	0	0	0
3.1699	6.858	7.06	3.43	0	1.65	2.12	4.48
3.6576	6.3398	7.06	12.25	0	9.47	7.57	15.98
4.8768	5.8979	7.06	9.53	0	12.62	8.53	12.62
6.1265	5.9436	7.06	9.16	0	12.12	8.19	12.12
7.3152	5.904	7.06	9.48	0	12.55	8.49	12.55
8.2906	6.3398	7.06	11.79	0	9.47	7.57	12.62
9.144	6.6142	7.06	7.30	0	5.86	4.69	7.81
10.3632	6.8275	7.06	3.81	0	3.06	2.44	4.07
12.192	6.8885	7.06	2.81	0	2.25	1.80	3.01
13.92	7.06	7.06	0	0	0	0	0
14.3256	7.1018	7.06	0	0	0	0	0
15.8496	7.3152	7.06	0	0	0	0	0
18.5928	7.4066	7.06	0	0	0	0	0
20.6959	7.8638	7.06	0	0	0	0	0
24.9936	8.0162	7.06	0	0	0	0	0

Tabla 6: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 2 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.

Por último, en la **figura 55** se han agrupado los valores que aparecen en la anterior tabla en una gráfica de dispersión que permite observar de manera más ilustrativa el comportamiento del cortante de flujo a lo largo de la sección transversal del estudio correspondiente al **tramo nº 2**.

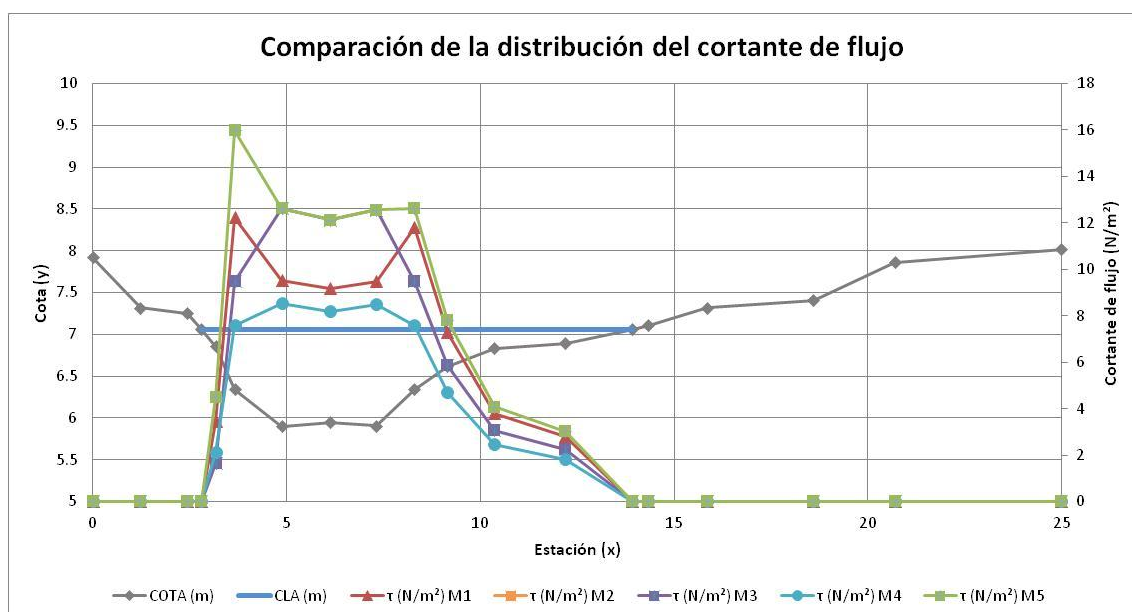


Figura 55: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 2. Para la representación en el gráfico, se han utilizado aquellos valores que han resultado ser máximos en cada método una vez comparados individualmente. Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en esta última gráfica (Además de en las dos tablas anteriores), los métodos que presentan una distribución de los valores del cortante de flujo más elevados son también, como en el estudio del **tramo nº 1**, el **método nº 3** y el **método nº 5**. Como consecuencia a este hecho, dichos métodos son los más adecuados para la posterior implantación en la aplicación informática que se pretende crear para el presente proyecto ya que, al tener unos valores más altos que los demás métodos, se está más cerca del lado de la seguridad. Por lo tanto, el método más adecuado en este segundo tramo de estudio corresponde con el **método nº 5** (verde), mientras que los peores métodos serían el **método nº 2** (por su imposible estimación) y el **método nº 4**.

Paralelamente, el método más adecuado para la utilización de la metodología para la estimación del cortante máximo del flujo en la margen externa de una curva corresponde también con el **método nº 5** puesto que adquiere unos valores más altos que en el **método nº 1**.

Para concluir, se va a comparar un método respecto de otro en función del valor del cortante máximo del flujo en el lecho. Para ello se tomará como referencia el máximo valor obtenido y se calcularán los porcentajes (%) que respecto a este valor suponen los restantes.

- **Método nº 5:** cortante de referencia (valor τ máx. en lecho = 12,62 N/m²)
- **Método nº 3:** 100 %.
- **Método nº 1:** 75,5 %.
- **Método nº 4:** 67,6 %.

Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 3 “Río Tajo”

Datos de partida de una sección transversal correspondiente al tramo nº 3 “Río Tajo”

Antes de empezar con el estudio particular de los cortantes del flujo para cada método se presentan, a modo de figuras ilustrativas adquiridas directamente del programa informático HEC-RAS, los datos de partida del **tramo nº 3** perteneciente al **río Tajo** que van a ser comunes para el cálculo de dichos parámetros.

En primer lugar, en la **figura 56** se muestra la geometría de una sección transversal representativa del tramo nº 3 con sus coordenadas x (estaciones) e y (cotas) además de los valores de la n de Manning y los puntos dónde HEC-RAS representa el inicio del talud y el final del lecho.

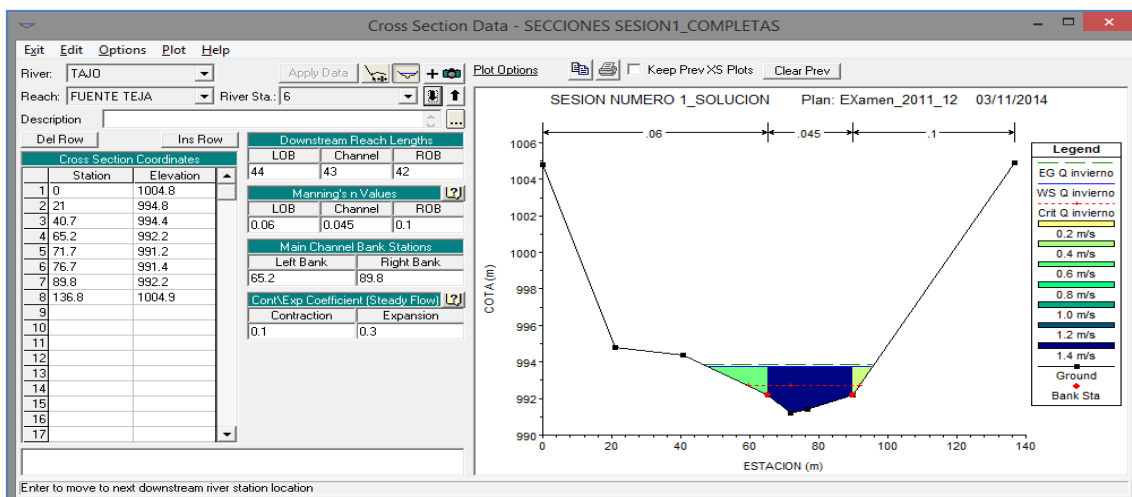


Figura 56: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.

En segundo lugar, en la **figura 57** se muestra para esa misma sección transversal las características hidráulicas y geométricas simuladas por HEC-RAS, es decir, los parámetros que se van a utilizar para la posterior estimación de los cortantes del flujo.

Además, un punto clave para considerar corresponde con que en este tercer tramo la modelización ha sido realizada utilizando un caudal total (Q) con un valor de 80,00 m³/s para un perfil de caudal de invierno.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	TAJO	Profile:	Qinvierno		
Reach	FUENTE TEJA	RS:	6	Plan:	sauce
Plan: sauce TAJO FUENTE TEJA RS: 6 Profile: Qinvierno					
E.G. Elev (m)	993.85	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.09	Wt. n-Val.	0.060	0.045	0.100
W.S. Elev (m)	993.76	Reach Len. (m)	44.00	43.00	42.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	13.48	51.26	4.48
E.G. Slope (m/m)	0.001480	Area (m2)	13.48	51.26	4.48
Q Total (m3/s)	80.00	Flow (m3/s)	7.29	71.29	1.42
Top Width (m)	47.68	Top Width (m)	17.33	24.60	5.76
Vel Total (m/s)	1.16	Avg. Vel. (m/s)	0.54	1.39	0.32
Max Chl Dpth (m)	2.56	Hydr. Depth (m)	0.78	2.08	0.78
Conv. Total (m3/s)	2079.6	Conv. (m3/s)	189.5	1853.1	37.0
Length Wtd. (m)	43.04	Wetted Per. (m)	17.40	24.70	5.96
Min Ch El (m)	991.20	Shear (N/m2)	11.24	30.11	10.90
Alpha	1.31	Stream Power (N/m s)	6549.70	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.12	Cum Volume (1000 m3)	9.99	19.87	1.62
C & E Loss (m)	0.03	Cum SA (1000 m2)	10.82	10.13	2.15

Figura 57: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fluvial nº 3. Fuente: HEC-RAS.

La pendiente media de los taludes utilizando la componente horizontal de inclinación Z, una vez calculada, ha resultado ser:

- Z en el talud izquierdo = 11. (Se ha seleccionado la estación 2, x=21, como punto final del talud).
- Z en el talud derecho = 4.

Método nº 1: Mays, 1999. Hydraulic Design Handbook

Una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 1** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 58** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 3** y sus valores a través del gráfico de barras.

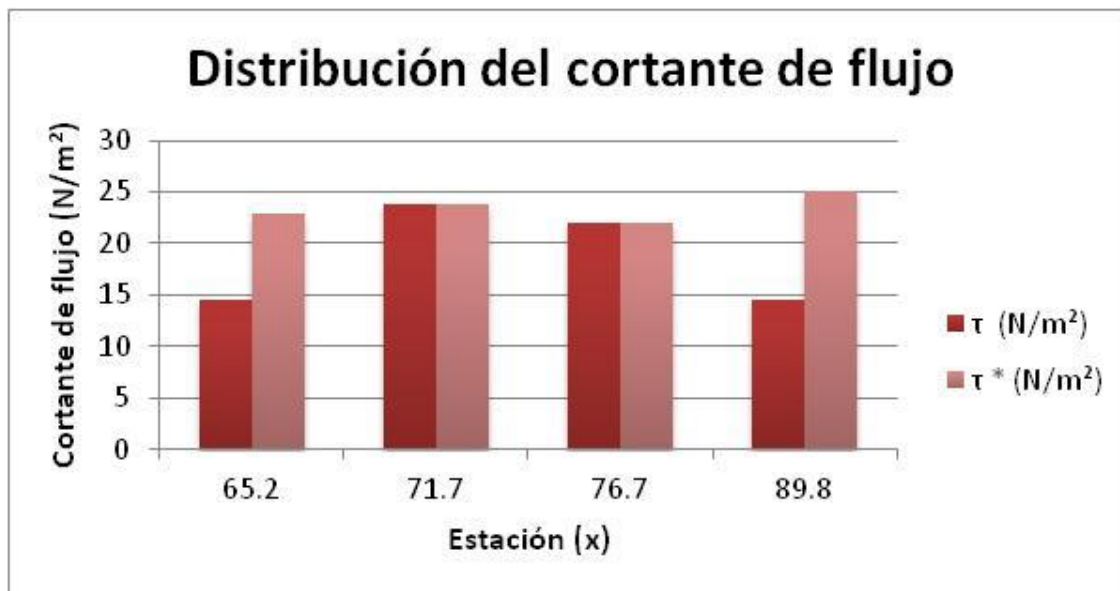


Figura 58: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 59** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

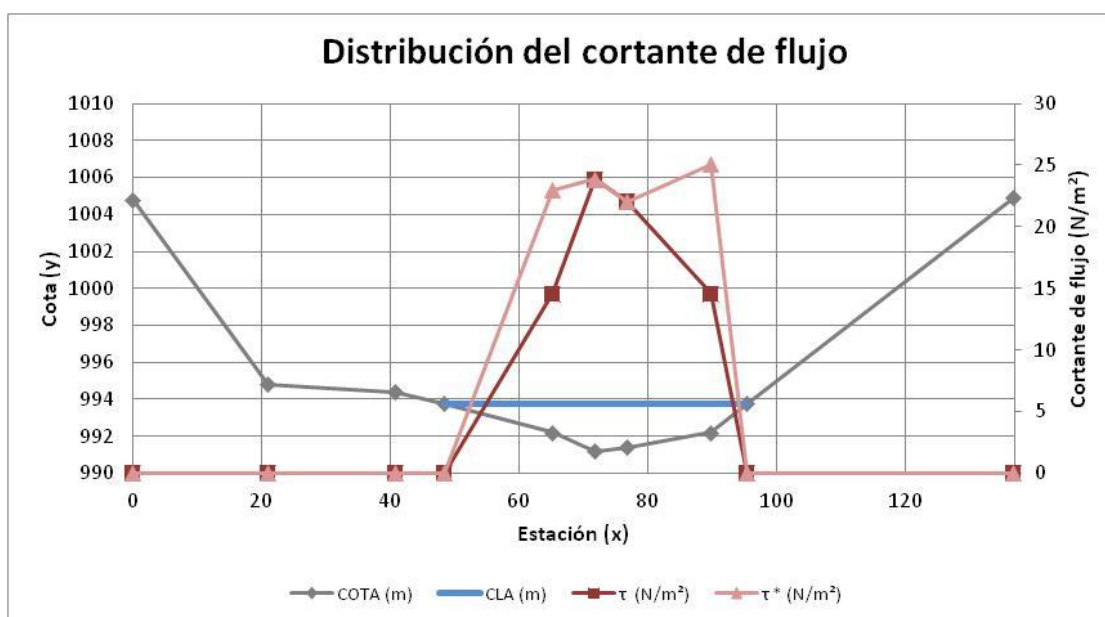


Figura 59: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 1.. Fuente: elaboración propia.

Método nº 2: United States Department of Agricultura (USDA), 2007. Stream Restoration Design National Engineering Handbook

Para la estimación de este método se han utilizado y calculado los siguientes parámetros:

- Cortante de flujo de referencia (τ_{∞}), en $N/m^2 = 11,35$.
- Rugosidad del grano (ns) = 0,025.
- Diámetro del grano ($D75$), en mm = 20.
- Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho (n) = 0,045.

Sin embargo, no ha podido realizarse el estudio correspondiente a la sección transversal seleccionada del **tramo nº 3** puesto que las gráficas para hallar el cortante máximo en el lecho y el cortante máximo en los taludes no se adecua a las características de dicha sección. Dichas gráficas no cuentan con la componente horizontal de inclinación del talud (Z) que se ajuste a los resultados de esta variable en la sección de estudio del **tramo nº 3** ya que no cuentan con curvas que relacionen $Z = 11$ y $Z = 4$.

Método nº 3: Lane, E. W. 1952

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al método nº 3 que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 60** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 3 y sus valores a través del gráfico de barras.

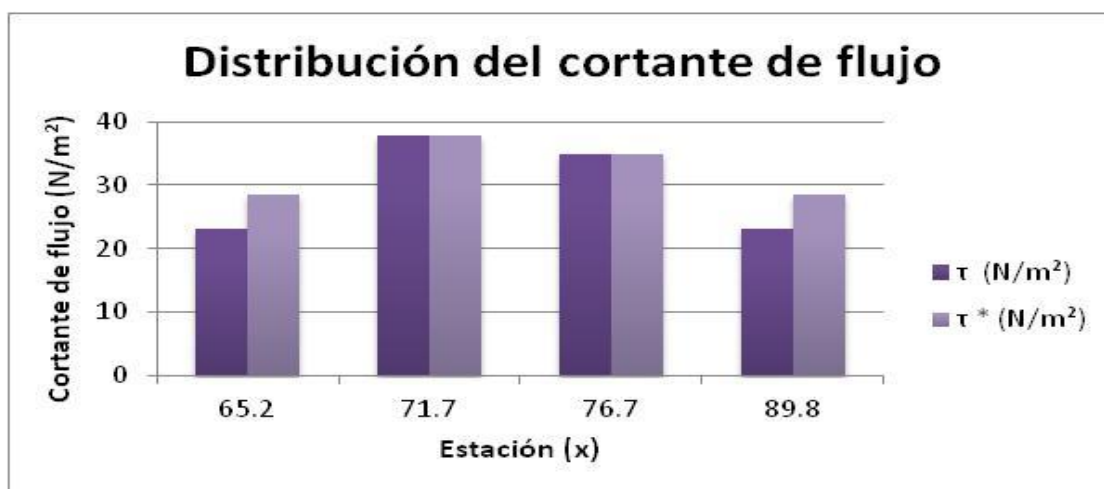


Figura 60: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 61** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

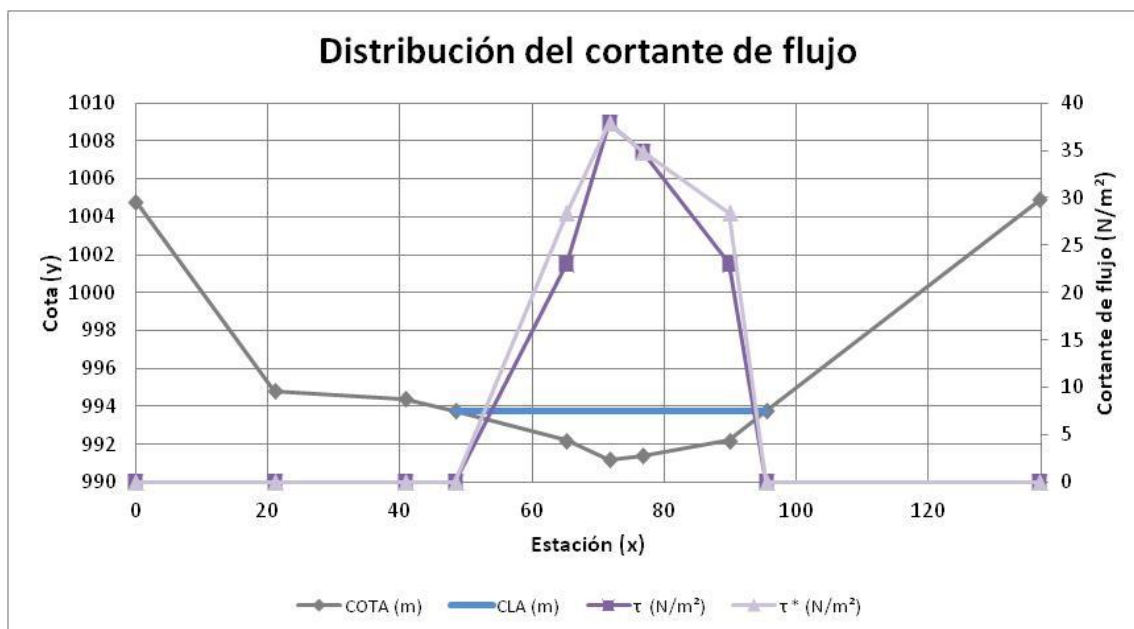


Figura 61: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Método nº 4: Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 4** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 62** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 3** y sus valores a través del gráfico de barras.

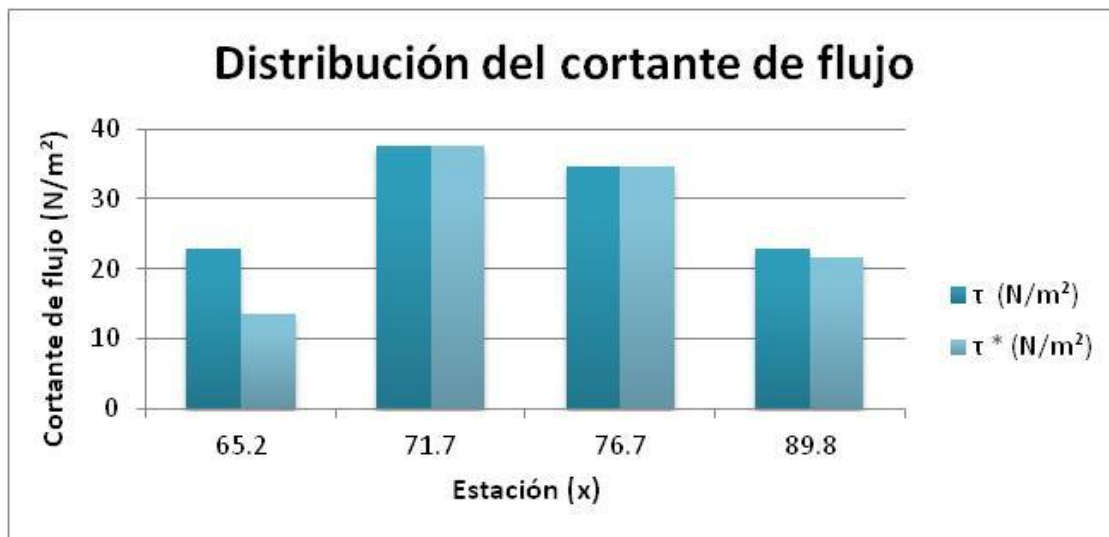


Figura 62: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en de la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 63** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

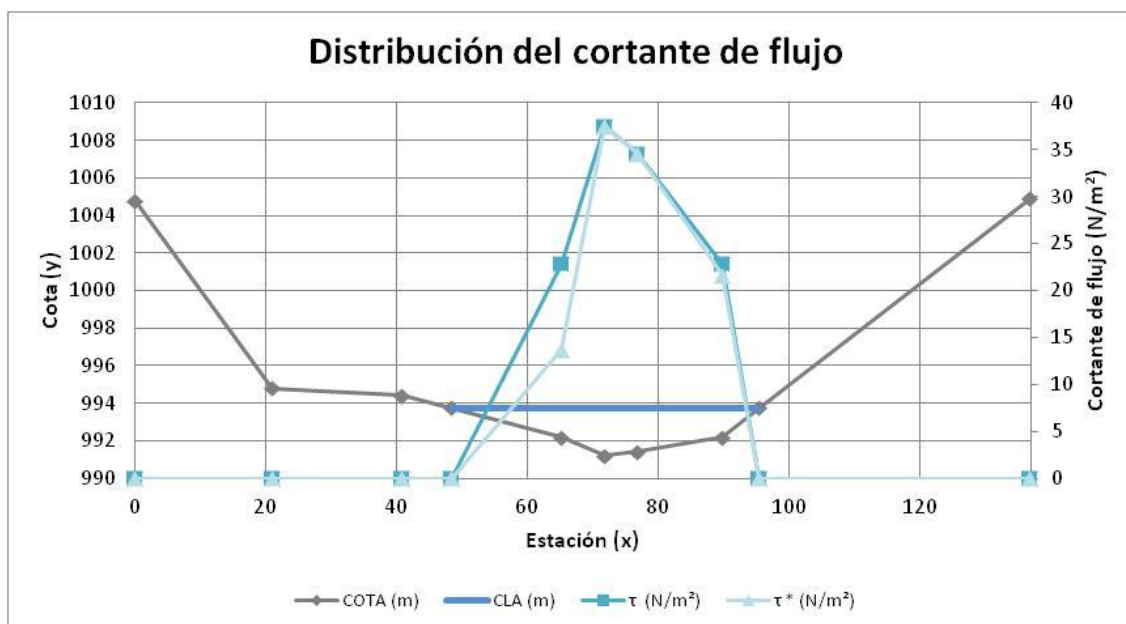


Figura 63: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Método nº 5: T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 5** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 64** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 3** y sus valores a través del gráfico de barras.

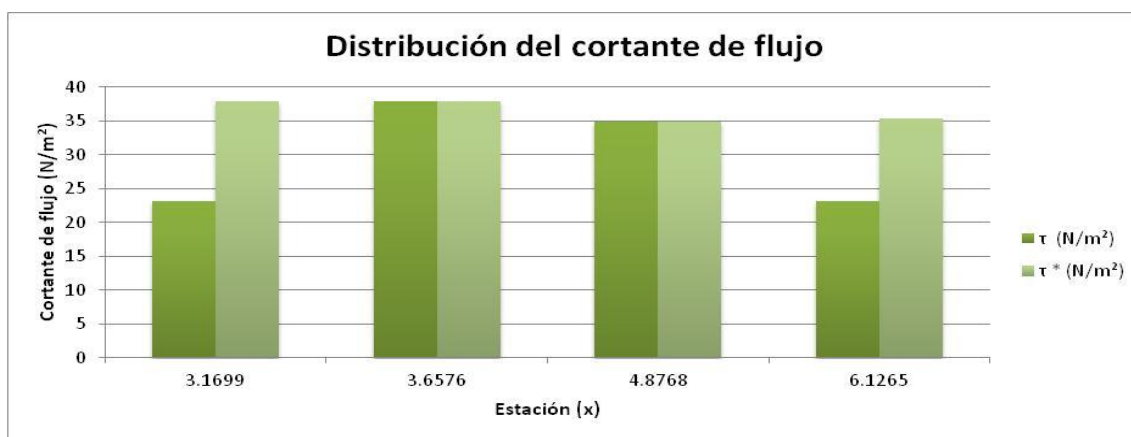


Figura 64: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 65** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

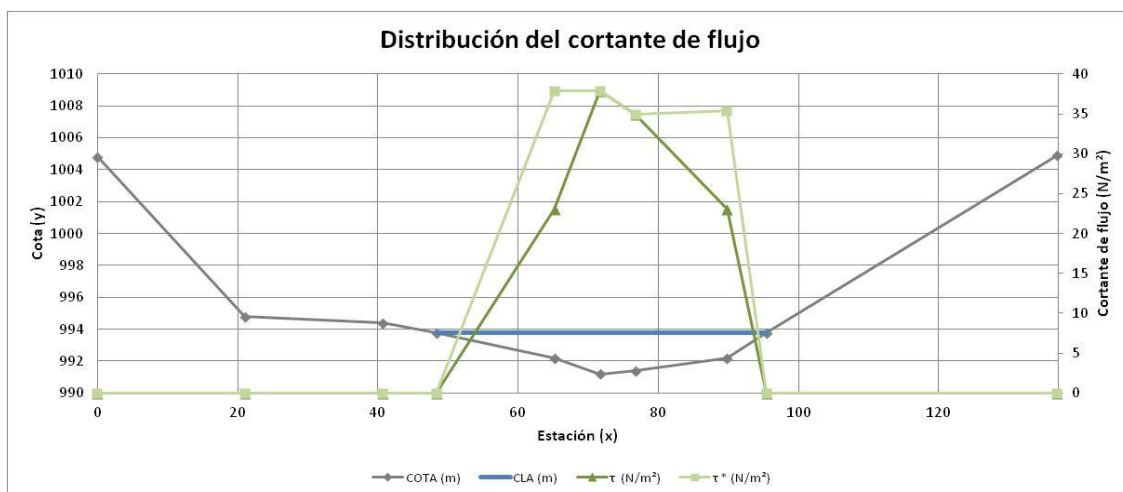


Figura 65: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 3 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Comparación de resultados

Con el propósito de que los anteriores estudios de los cinco métodos puedan observarse más adecuadamente, se ha realizado una comparación que refleja en una tabla los valores del cortante medio en el lecho, del cortante máximo en el lecho y de los cortantes máximos en cada talud para cada método (ver **tabla nº 7**). Además, en esta misma tabla se muestra la media y el coeficiente de variación (**CV**) de las cinco metodologías según los valores de los cortantes del flujo.

	M1	M2	M3	M4	M5	Media	CV
Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	0,00
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	23,90	-	37,89	37,50	37,89	34,30	0,20
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	22,98	-	28,42	13,67	37,89	25,74	0,39
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	25,06	-	28,42	21,70	35,39	27,64	0,21

Tabla 7: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 3. Fuente: elaboración propia.

A la vista de los resultados expuestos en la anterior **tabla nº 7**, el coeficiente de variación para el cortante máximo del flujo en el lecho supone un 20% de la media y para los cortantes máximos del flujo en el talud izquierdo y en el talud derecho, un 39% y un 21% de la media respectivamente. Por lo tanto, en este caso de estudio perteneciente al **tramo nº 3**, los resultados correspondientes a las cinco metodologías en este tramo fluvial se han alejado de la media en mayor medida que en los tramos anteriores. Este hecho se explica puesto que en el **método nº 1** los valores máximos de los cortantes del flujo han resultado ser más bajos que en los demás métodos al igual que en el **método nº 4**, especialmente el valor del cortante máximo del flujo en el talud izquierdo. Sin embargo, esta dispersión no genera ningún problema ya que el rango de valores de los cortantes máximos es suficientemente estrecho para este tramo de estudio.

Igualmente, se ha creado una tabla más detallada que agrupa las cinco metodologías de cálculo para la misma sección transversal seleccionada del **tramo nº 3**. En dicha tabla aparece la distribución del cortante del flujo que ha resultado contener los valores más elevados de la comparación de cada distribución por separado de los métodos, es decir, la distribución del color que ha supuesto que los cortantes del flujo sean mayores (ver **tabla nº 8**). Asimismo, en color azul se representan las filas que coinciden con el lecho.

ESTACIÓN (m)	COTA (m)	CLA (m)	τ (N/m ²) M1	τ (N/m ²) M2	τ (N/m ²) M3	τ (N/m ²) M4	τ (N/m ²) M5
0	1004.8	993.76	0	0	0	0	0
21	994.8	993.76	0	0	0	0	0
40.7	994.4	993.76	0	0	0	0	0
48.32	993.76	993.76	0	0	0	0	0
65.2	992.2	993.76	22.98	0	28.42	22.85	37.89
71.7	991.2	993.76	23.90	0	37.89	37.50	37.89
76.7	991.4	993.76	22.03	0	34.93	34.57	34.93
89.8	992.2	993.76	25.06	0	28.42	22.85	35.39
95.4	993.76	993.76	0.00	0	0.00	0.00	0.00
136.8	1004.9	993.76	0.00	0	0.00	0.00	0.00

Tabla 8: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 3 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.

Por último, en la **figura 66** se han agrupado los valores que aparecen en la anterior tabla en una gráfica de dispersión que permite observar de manera más ilustrativa el comportamiento del cortante de flujo a lo largo de la sección transversal del estudio correspondiente al **tramo nº 3**.

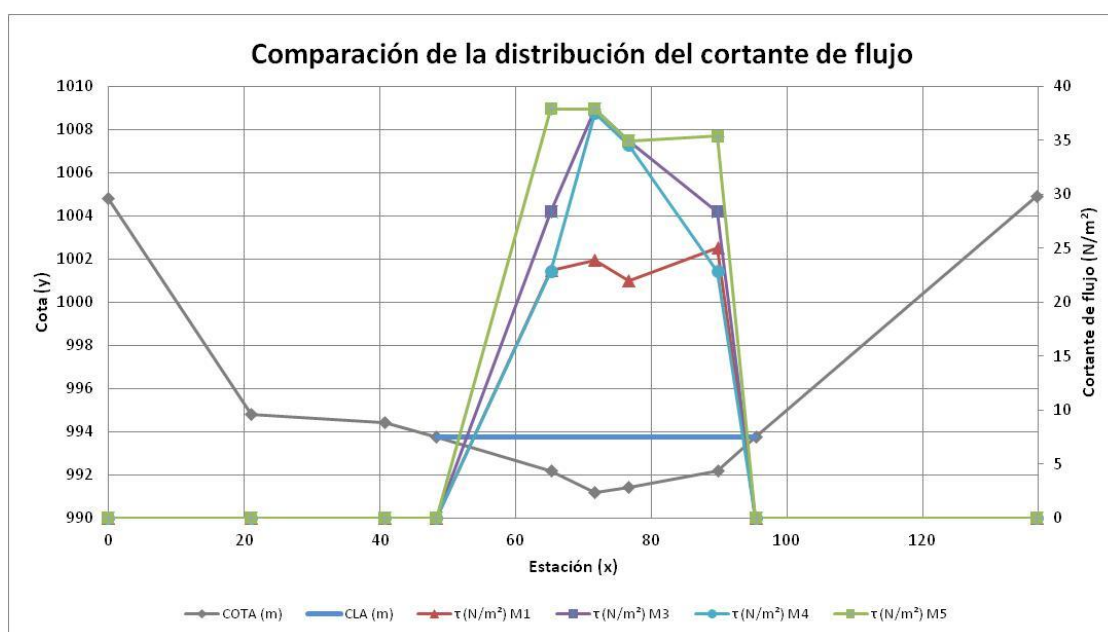


Figura 66: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 3. Fuente: elaboración propia.

Como en los casos anteriores, los métodos que presentan una distribución de los valores del cortante de flujo más elevados son el **método nº 3** y el **método nº 5**. Como consecuencia a este hecho, dichos métodos son los más adecuados para la posterior implantación en la aplicación informática que se pretende crear para el presente proyecto ya que, al tener unos valores más altos que los demás métodos, se está más cerca del lado de la seguridad. Por lo tanto, el método más adecuado en este primer tramo de estudio corresponde con el **método nº 5** (verde), mientras que los peores métodos serían los correspondientes al **método nº 2** (por su imposible estimación) y al **método nº 1** (ya que cuenta con los valores más bajos de entre los demás métodos).

Para concluir, se va a comparar un método respecto de otro en función del valor del cortante máximo del flujo en el lecho. Para ello se tomará como referencia el máximo valor obtenido y se calcularán los porcentajes (%) que respecto a este valor suponen los restantes.

- **Método nº 5:** cortante de referencia (valor τ máx. en lecho = 37,89 N/m²)
- **Método nº 3:** 100 %.
- **Método nº 4:** 98,9 %.
- **Método nº 1:** 63,1 %.

Estudio de la metodología de cálculo para el tramo nº 4 “Critical creek”

Datos de partida de una sección transversal correspondiente al tramo nº 4 “Critical creek”

Antes de empezar con el estudio particular de los cortantes del flujo para cada método se presentan, a modo de figuras ilustrativas adquiridas directamente del programa informático HEC-RAS, los datos de partida del **tramo nº 4** perteneciente al río “**Critical creek**” que van a ser comunes para el cálculo de dichos parámetros.

En primer lugar, en la **figura 67** se muestra la geometría de una sección transversal representativa del **tramo nº 4** con sus coordenadas x (estaciones) e y (cotas) además de los valores de la n de Manning y los puntos dónde HEC-RAS representa el inicio del talud y el final del lecho.

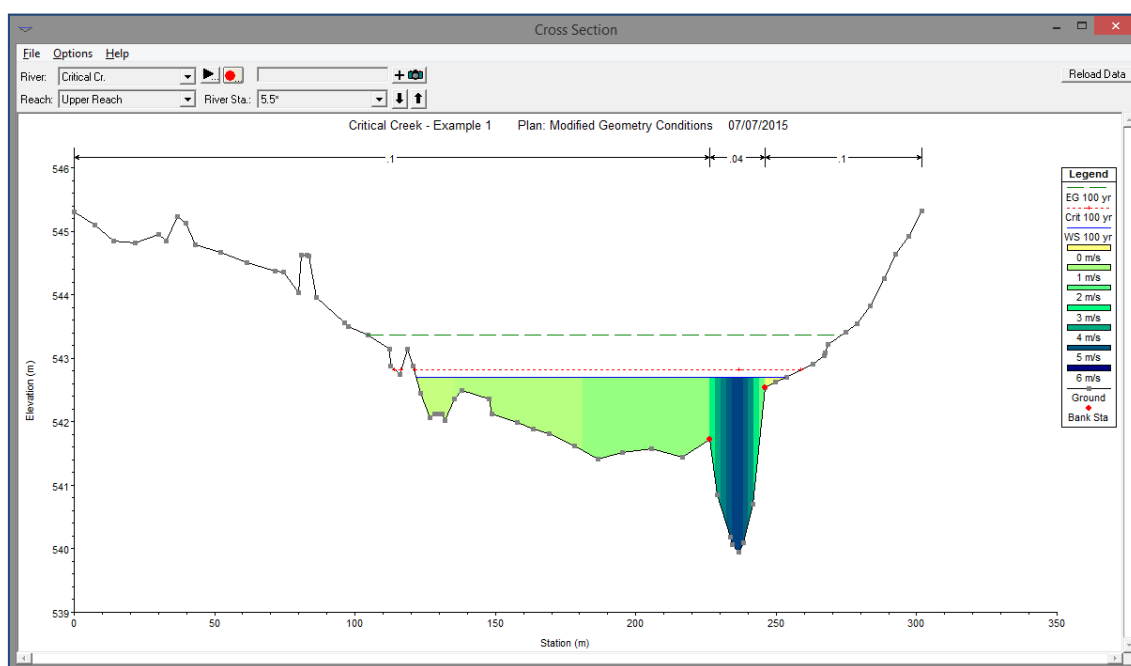


Figura 67: Ejemplo de una sección transversal del tramo fluvial nº 4. Fuente: HEC-RAS.

En segundo lugar, en la **figura 68** se muestra para esa misma sección transversal las características hidráulicas y geométricas simuladas por HEC-RAS, es decir, los parámetros que se van a utilizar para la posterior estimación de los cortantes del flujo.

Además, un punto clave para considerar corresponde con que en este cuarto tramo la modelización ha sido realizada utilizando un caudal total (Q) con un valor de 269,01 m³/s para un periodo de retorno de 100 años.

Plan: Modified Geo Critical Cr. Upper Reach RS: 5.5* Profile: 100 yr					
E.G. Elev (m)	543.37	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.68	Wt. n-Val.	0.100	0.040	0.100
W.S. Elev (m)	542.69	Reach Len. (m)	27.94	26.92	22.86
Crit W.S. (m)	542.82	Flow Area (m2)	90.09	38.88	0.50
E.G. Slope (m/m)	0.013568	Area (m2)	90.09	38.88	0.50
Q Total (m3/s)	269.01	Flow (m3/s)	95.07	173.84	0.10
Top Width (m)	131.40	Top Width (m)	104.35	19.81	7.24
Vel Total (m/s)	2.08	Avg. Vel. (m/s)	1.06	4.47	0.20
Max Chl Dpth (m)	2.74	Hydr. Depth (m)	0.86	1.96	0.07
Conv. Total (m3/s)	2309.5	Conv. (m3/s)	816.2	1492.4	0.8
Length Wtd. (m)	27.30	Wetted Per. (m)	104.46	20.44	7.24
Min Ch El (m)	539.95	Shear (N/m2)	114.75	253.12	9.15
Alpha	3.08	Stream Power (N/m s)	14447.24	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.37	Cum Volume (1000 m3)	117.51	19.29	1.81
C & E Loss (m)	0.01	Cum SA (1000 m2)	122.33	10.36	5.30

Figura 68: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio del tramo fluvial nº 4.

Fuente: HEC-RAS.

La pendiente media de los taludes utilizando la componente horizontal de inclinación Z, una vez calculada, ha resultado ser:

- Z en el talud izquierdo = 3.
- Z en el talud derecho = 2.

Método nº 1: Mays, 1999. Hydraulic Design Handbook

Una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 1** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 69** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 4** y sus valores a través del gráfico de barras.

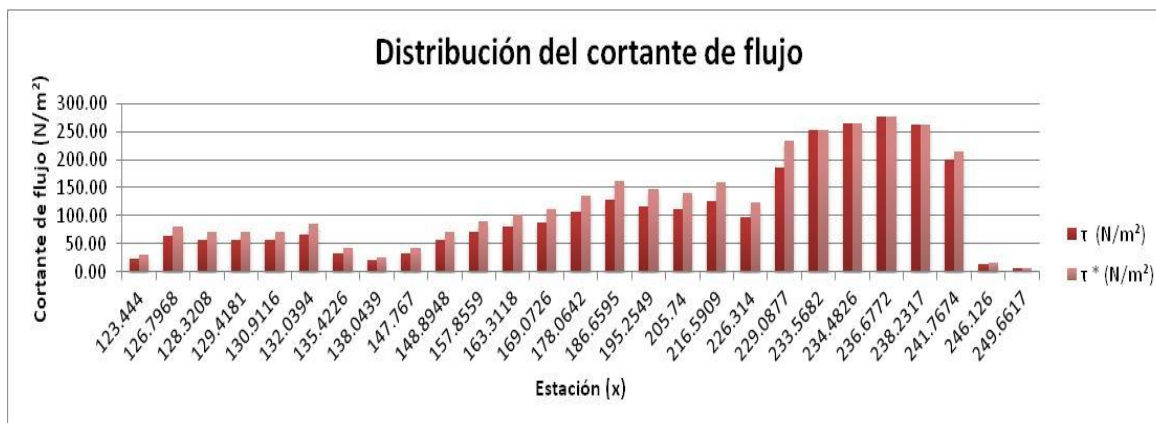


Figura 69: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 70** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

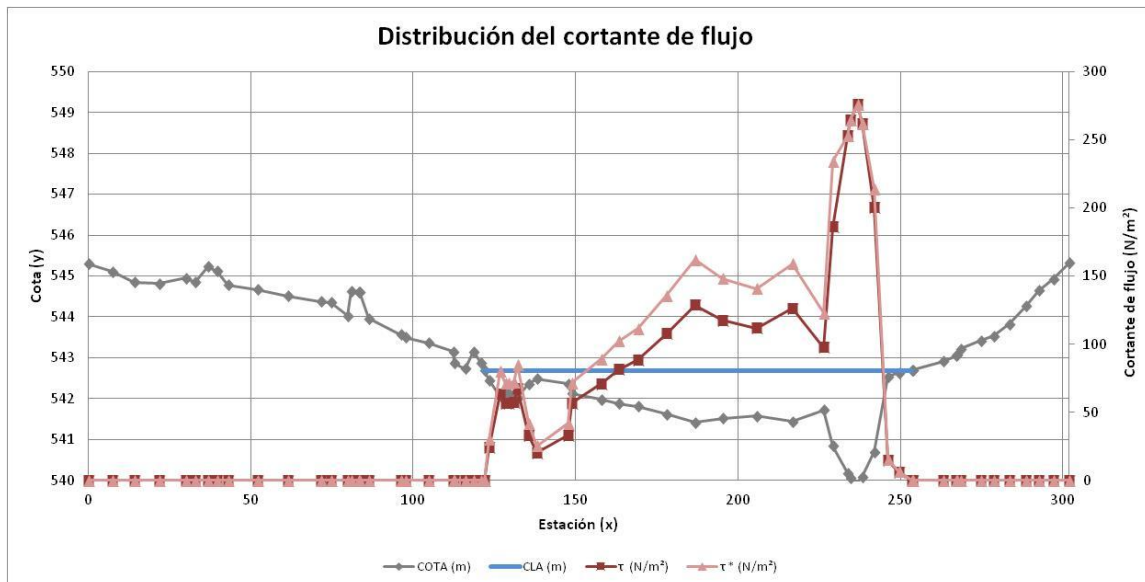


Figura 70: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 1. Fuente: elaboración propia.

Método nº 2: United States Department of Agricultura (USDA), 2007. Stream Restoration Design National Engineering Handbook

Para la estimación de este método se han utilizado y calculado lo siguientes parámetros:

- Cortante de flujo de referencia (τ_{∞}), en $\text{N/m}^2 = 140,75$.
- Rugosidad del grano (ns) = 0,025.
- Diámetro del grano (D_{75}), en $\text{mm} = 20$.
- Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho (n) = 0,04.

Sin embargo, no ha podido realizarse el estudio correspondiente a la sección transversal seleccionada del **tramo nº 4** puesto que las gráficas para hallar el cortante máximo en el lecho y el cortante máximo en los taludes no se adecua a las características de dicha sección. Dichas gráficas no cuentan con la componente horizontal de inclinación del talud (Z) que se ajuste a los resultados de esta variable en la sección de estudio del **tramo nº 4** más que para hallar el cortante máximo del flujo en el talud derecho ($Z = 2$).

Método nº 3: Lane, E. W. 1952

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 3** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 71** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 4** y sus valores a través del gráfico de barras.

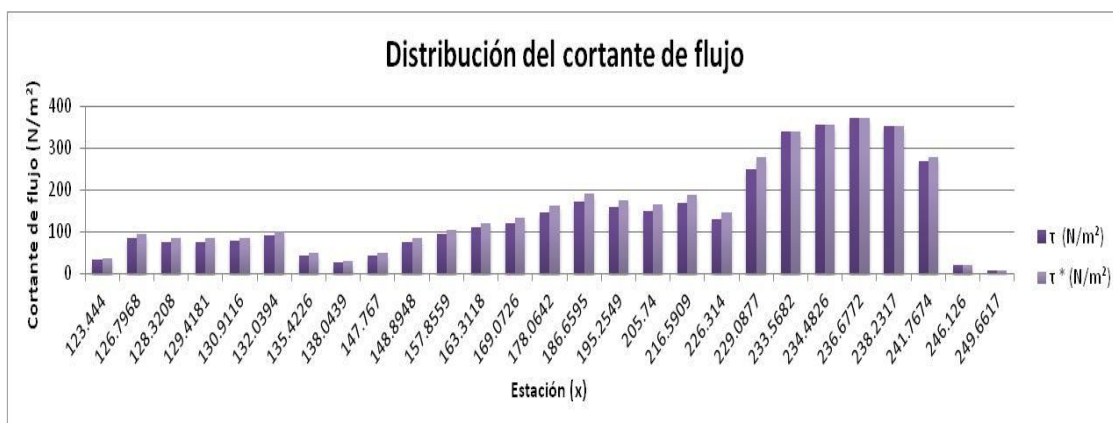


Figura 71: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 72** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

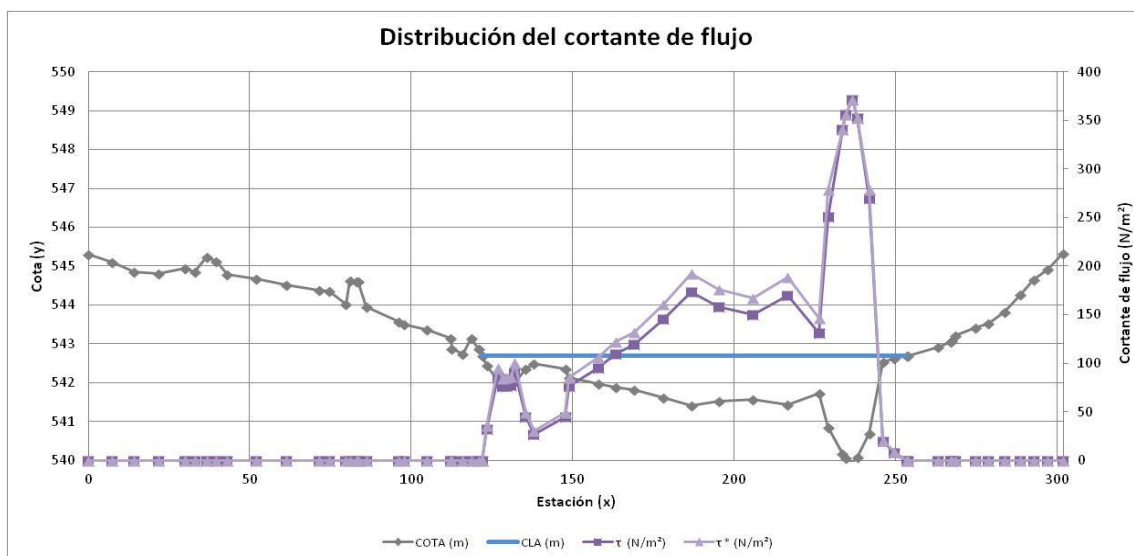


Figura 72: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 3. Fuente: elaboración propia.

Método nº 4: Javid, S., & Mohammadi, M. (2012). *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 4** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 73** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 4** y sus valores a través del gráfico de barras.

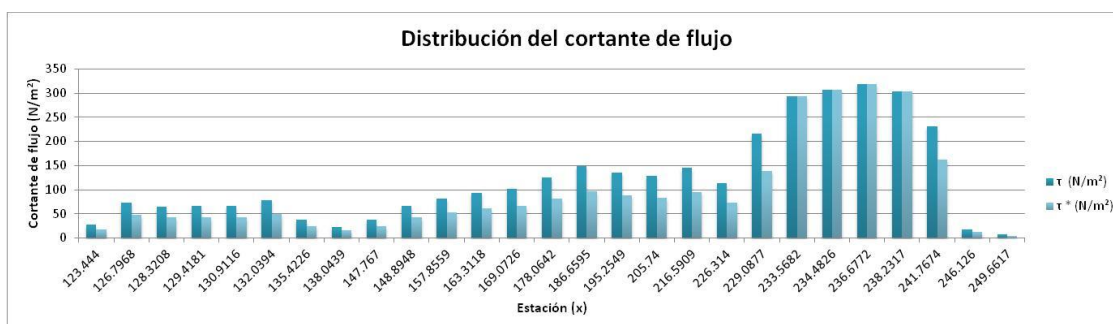


Figura 73: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 74** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

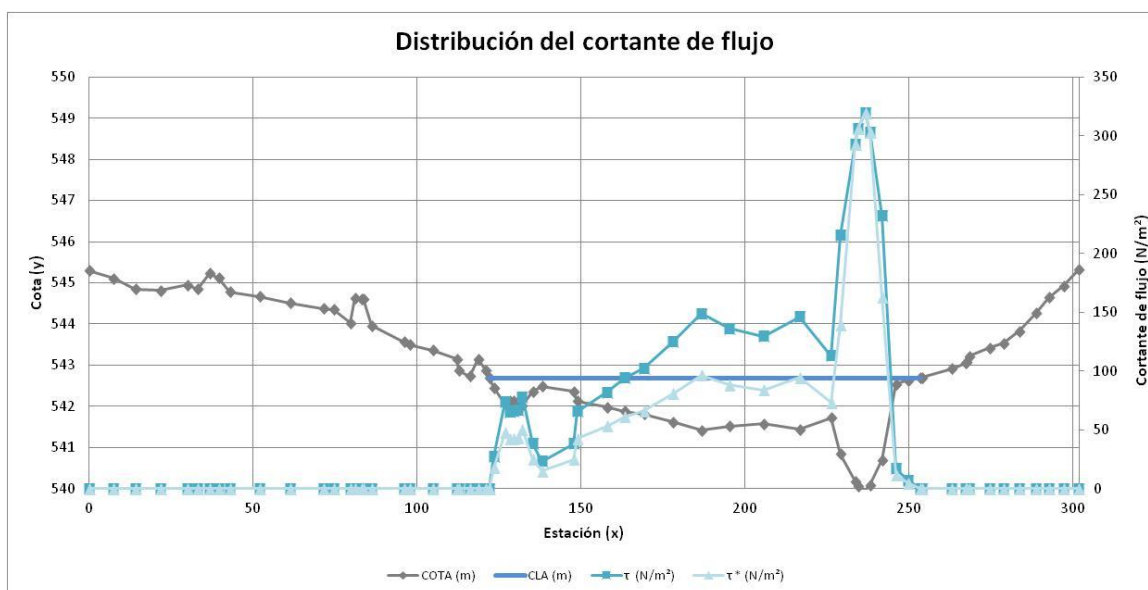


Figura 74: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 4. Fuente: elaboración propia.

Método nº 5: T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*

Como en los casos anteriores, una vez realizado el procedimiento de cálculo correspondiente al **método nº 5** que ha sido expuesto en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**, se muestran los resultados a modo de gráfico de barras y de gráfico de dispersión.

A continuación, en la **figura 75** se muestra la distribución de cortantes en la sección transversal seleccionada del **tramo nº 4** y sus valores a través del gráfico de barras.

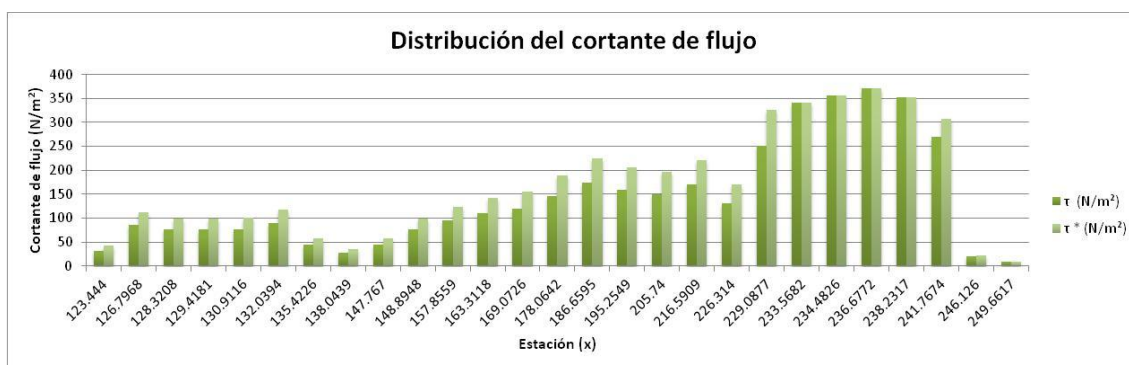


Figura 75: Gráfico de barras correspondiente a la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Una vez detallada la distribución de cortante de flujo y sus valores en el anterior gráfico, en la **figura 76** se muestra dicha distribución de una forma más ilustrativa a través de la vista de la sección transversal.

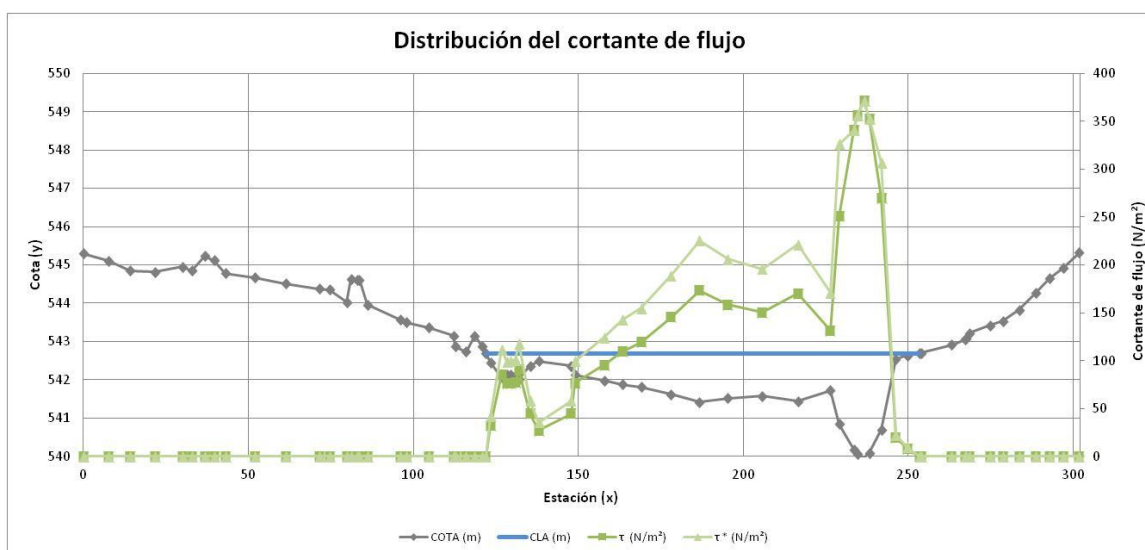


Figura 76: Gráfico de dispersión que muestra la distribución de cortantes del flujo en la sección transversal perteneciente al tramo nº 4 y utilizando el método nº 5. Fuente: elaboración propia.

Comparación de resultados

Con el propósito de que los anteriores estudios de los cinco métodos puedan observarse más adecuadamente, se ha realizado una comparación que refleja en una tabla los valores del cortante medio en el lecho, del cortante máximo en el lecho y de los cortantes máximos en cada talud para cada método (ver **tabla nº 9**). Además, en esta misma tabla se muestra la media y el coeficiente de variación (**CV**) de las cinco metodologías según los valores de los cortantes del flujo.

	M1	M2	M3	M4	M5	Media	CV
Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	258,08	258,08	258,08	258,08	258,08	258,08	0,00
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	275,58	-	371,33	319,16	371,33	334,35	0,14
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	234,24	-	278,50	139,47	326,22	244,61	0,33
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	213,74	-	278,50	162,71	306,81	240,44	0,27

Tabla 9: Tabla que muestra los valores medios y máximos del parámetro correspondiente al cortante de flujo para cada uno de los métodos de estudio del tramo fluvial nº 4. Fuente: elaboración propia.

A la vista de los resultados expuestos en la anterior **tabla nº 9**, el coeficiente de variación para el cortante máximo del flujo en el lecho supone un 14% de la media y para los cortantes máximos del flujo en el talud izquierdo y en el talud derecho, un 33% y un 27% de la media respectivamente. Por lo tanto, en este caso de estudio perteneciente al **tramo nº 4**, los resultados correspondientes a las cinco metodologías en este tramo fluvial se han alejado de la media en mayor medida que en los dos primeros tramos. Este hecho se explica puesto que en el **método nº 4** los valores máximos de los cortantes del flujo han resultado ser más bajos que en los demás métodos al igual que en el **método nº 1**. Los coeficientes de variación correspondientes a ambos taludes dan un rango de valores considerablemente amplio, por lo que primaría, como se verá a continuación, aquel método que obtenga los valores más altos en la distribución del cortante del flujo.



Igualmente, se ha creado una tabla más detallada que agrupa las cinco metodologías de cálculo para la misma sección transversal seleccionada del **tramo nº 4**. En dicha tabla aparece la distribución del cortante del flujo considerando los valores más elevados de la comparación de cada distribución por separado de los métodos, es decir, la distribución del color que ha supuesto que los cortantes del flujo sean mayores (ver **tabla nº 10**). Asimismo, en color azul se representan las filas que coinciden con el lecho.

ESTACIÓN (m)	COTA (m)	CLA (m)	τ (N/m ²) M1	τ (N/m ²) M2	τ (N/m ²) M3	τ (N/m ²) M4	τ (N/m ²) M5
0	545.3024	542.69	0	0	0	0	0
7.4676	545.1043	542.69	0	0	0	0	0
14.2037	544.8453	542.69	0	0	0	0	0
21.7018	544.8148	542.69	0	0	0	0	0
29.9314	544.9519	542.69	0	0	0	0	0
32.9184	544.8453	542.69	0	0	0	0	0
36.6674	545.2263	542.69	0	0	0	0	0
39.6545	545.1196	542.69	0	0	0	0	0
43.0073	544.7843	542.69	0	0	0	0	0
51.9989	544.6624	542.69	0	0	0	0	0
61.3562	544.5099	542.69	0	0	0	0	0
71.4451	544.3728	542.69	0	0	0	0	0
74.5846	544.3575	542.69	0	0	0	0	0
79.7357	544.0253	542.69	0	0	0	0	0
81.0158	544.6288	542.69	0	0	0	0	0
83.058	544.6166	542.69	0	0	0	0	0
83.5762	544.6105	542.69	0	0	0	0	0
86.167	543.9644	542.69	0	0	0	0	0
96.1339	543.562	542.69	0	0	0	0	0
97.7189	543.5042	542.69	0	0	0	0	0
104.7293	543.3609	542.69	0	0	0	0	0
112.2274	543.1506	542.69	0	0	0	0	0
112.5931	542.8701	542.69	0	0	0	0	0
115.9764	542.7391	542.69	0	0	0	0	0
118.5672	543.1506	542.69	0	0	0	0	0
120.8227	542.8793	542.69	0	0	0	0	0
121.96	542.69	542.69	0	0	0	0	0
123.444	542.4525	542.69	30.12		35.81	27.70	41.95
126.7968	542.0594	542.69	79.98		95.09	73.54	111.39
128.3208	542.1295	542.69	71.09		84.52	65.37	99.01
129.4181	542.1264	542.69	71.48		84.99	65.73	99.56
130.9116	542.1203	542.69	72.26		85.91	66.44	100.63
132.0394	542.0228	542.69	84.62		100.61	77.81	117.86
135.4226	542.3611	542.69	41.72		49.60	38.36	58.10
138.0439	542.4891	542.69	25.48		30.30	23.43	35.49
147.767	542.3611	542.69	41.72		49.60	38.36	58.10
148.8948	542.1264	542.69	71.48		84.99	65.73	99.56
157.8559	541.9862	542.69	89.27		106.13	82.08	124.32
163.3118	541.8826	542.69	102.41		121.76	94.16	142.62
169.0726	541.8125	542.69	111.30		132.33	102.33	155.00
178.0642	541.6204	542.69	135.66		161.30	124.74	188.94
186.6595	541.4132	542.69	161.94		192.54	148.90	225.54
195.2549	541.5229	542.69	148.03		176.00	136.11	206.16
205.74	541.5808	542.69	140.69		167.27	129.35	195.93
216.5909	541.4376	542.69	158.85		188.86	146.05	221.23
226.314	541.7211	542.69	122.89		146.11	112.99	171.15
229.0877	540.8432	542.69	234.24		278.50	215.37	326.22
233.5682	540.1788	542.69	252.86		340.72	292.86	340.72
234.4826	540.0629	542.69	264.53		356.44	306.37	356.44
236.6772	539.9532	542.69	275.58		371.33	319.16	371.33
238.2317	540.0903	542.69	261.77		352.73	303.18	352.73
241.7674	540.703	542.69	213.74		278.50	231.72	306.81
246.126	542.544	542.69	15.71		20.46	17.03	22.54
249.6617	542.6293	542.69	6.53		8.51	7.08	9.37
253.37	542.69	542.69	0		0	0	0
253.8679	542.7025	542.69	0		0	0	0
263.1034	542.9128	542.69	0		0	0	0
267.1267	543.0469	542.69	0		0	0	0
267.401	543.0774	542.69	0		0	0	0
268.4678	543.2206	542.69	0		0	0	0
274.6858	543.4157	542.69	0		0	0	0
278.7396	543.5377	542.69	0		0	0	0
283.6164	543.8272	542.69	0		0	0	0
288.6456	544.26	542.69	0		0	0	0
292.669	544.6411	542.69	0		0	0	0
297.0581	544.9245	542.69	0		0	0	0
301.752	545.3177	542.69	0		0	0	0

Tabla 10: Tabla correspondiente con los valores de los esfuerzos cortantes en la sección transversal seleccionada del tramo nº 4 y utilizando las cinco metodologías de cálculo. Fuente: elaboración propia.

Por último, en la **figura 77** se han agrupado los valores que aparecen en la anterior tabla en una gráfica de dispersión que permite observar de manera más ilustrativa el comportamiento del cortante de flujo a lo largo de la sección transversal del estudio correspondiente al **tramo nº 4**.

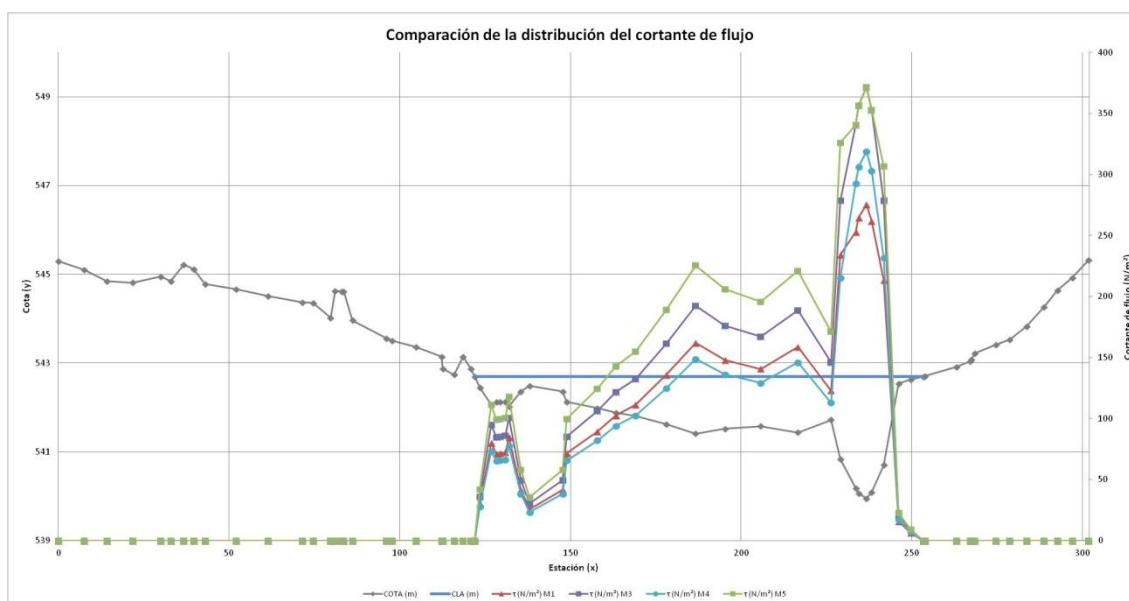


Figura 77: Gráfico de dispersión que muestra la comparación entre las cinco metodologías de cálculo de los cortantes del flujo para una misma sección transversal seleccionada del tramo nº 4. Para la representación en el gráfico, se han utilizado aquellos valores que han resultado ser máximos en cada método una vez comparados individualmente. Fuente: elaboración propia.

Como en los últimos 3 tramos, los métodos que presentan una distribución de los valores del cortante de flujo más elevados son el **método nº 3** y el **método nº 5**. Como consecuencia a este hecho, dichos métodos son los más adecuados para la posterior implantación en la aplicación informática que se pretende crear para el presente proyecto ya que, al tener unos valores más altos que los demás métodos, se está más cerca del lado de la seguridad. Por lo tanto, el método más adecuado en este primer tramo de estudio corresponde con el método nº 5 (verde), mientras que los peores métodos serían los correspondientes al **método nº 2** (por su imposible estimación) y al **método nº 1** (ya que cuenta con los valores más bajos de entre los demás métodos).

Para concluir, se va a comparar un método respecto de otro en función del valor del cortante máximo del flujo en el lecho. Para ello se tomará como referencia el máximo valor obtenido y se calcularán los porcentajes (%) que respecto a este valor suponen los restantes.

- **Método nº 5:** cortante de referencia (valor τ máx. en lecho = 371,33 N/m²)
- **Método nº 3:** 100 %.
- **Método nº 4:** 85,9 %.
- **Método nº 1:** 74,2 %.

4.8. Selección final de la metodología de cálculo

A la vista de los resultados obtenidos, en el apartado **4.7.4. Aplicación y resultados** en el que se ha desarrollado el estudio de la metodología de cálculo del cortante de flujo, se ha llegado a la conclusión de cuál es el método más adecuado para su implantación en la aplicación informática que utiliza el presente proyecto.

El **método nº 5**, sacado del libro *“Design of Roadside Channels with Flexible Linings”* y publicado por los autores T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. en el año 2005, ha resultado ser el más apropiado para el fin que se buscaba y las razones por las que se ha elegido esta metodología y no otra se explican a continuación:

- En el apartado **4.6. Revisión bibliográfica y selección de los métodos de estimación de los cortantes del flujo**, aparece la **tabla nº 2** la cual reflejaba las consideraciones iniciales que debían cumplir cada metodología. El **método nº 5** cumple todas estas consideraciones con la excepción de que su estudio ha sido probado en cauces naturales. Esta consideración la comparten todos los demás métodos pero se ve posteriormente que puede ajustarse en mayor medida en el **método nº 5** que en los otros.
- En lo que respecta al apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes de flujo**, en los que se presentaba el procedimiento de cálculo para hallar el cortante medio del flujo y sus valores máximos en el lecho y en los taludes, se puede observar que el **método nº 5** apenas cuenta con limitaciones. Además, no cuenta con gráficas ni con fórmulas difíciles que se interpongan para su sistematización en Microsoft Excel. Una consideración final sería que las fórmulas que utiliza dicho método no son excluyentes para ningún tipo de cauce natural ya que tiene en cuenta el factor de seguridad, cualquier componente horizontal de inclinación (Z) y el efecto de la curvatura con su longitud asociada aguas abajo y la elevación de la superficie del agua.
- Por último, en el apartado **4.7.4. Aplicación y resultados**, se puede observar que el **método nº 5** no ha tenido ningún problema en cuanto a su aplicación en los cuatro tramos de estudio y ha obtenido los valores más altos de los cortantes de flujo a lo largo de su distribución transversal en las secciones. Por lo tanto, este método se posiciona del lado de la seguridad y reduce los posibles errores a la hora de implantar una técnica de bioingeniería.

5. Protocolo para la selección de técnicas de bioingeniería

5.1. Introducción

Una vez seleccionada la metodología de cálculo de los parámetros esenciales (velocidad del flujo, pendiente del talud y cortante de flujo) para que una obra de bioingeniería tenga éxito, se ha procedido a sistematizar todos estos procedimientos de cálculo para que el usuario obtenga la técnica de bioingeniería más adecuada introduciendo los datos que representan las características de un determinado tramo fluvial.

El procedimiento que se utiliza para la selección de las técnicas de bioingeniería utilizando la aplicación informática creada en el presente proyecto puede observarse en el general correspondiente al apartado **2. Esquema de trabajo correspondiente al proyecto de investigación.**

Seguidamente, en este apartado **5. Protocolo para la selección de técnicas de bioingeniería**, se va a explicar como el usuario debe proceder para la obtención de las técnicas de bioingeniería más aconsejables según el tramo de un río que se pretende restaurar, utilizando la aplicación creada en el presente proyecto de investigación.

En un primer lugar, se explican los pasos a seguir en el programa informático HEC-RAS que atañe el paso previo para la obtención de datos del tramo que se requiere estudiar. Si no existieran datos en HEC-RAS del tramo fluvial, deberá crearse la geometría manualmente realizando anteriormente un trabajo en campo para obtener los valores geométricos del tramo y demás parámetros necesarios.

En un segundo lugar, se explican aquellos pasos a seguir en Microsoft Excel una vez conseguidos todos los parámetros necesarios previamente en HEC-RAS. La herramienta informática Microsoft Excel es la que se utiliza para la realización de los cálculos de los parámetros y la que cuenta con la base de datos de las técnicas de bioingeniería; en ella, se obtienen los resultados numéricos de las características del tramo fluvial y los resultados de las técnicas de bioingeniería que más se ajustan a estas características.

5.2. Paso previo: HEC-RAS

La modelización hidráulica de un tramo de un curso fluvial corresponde con el paso previo para conocer el comportamiento de la lámina de agua resultante y sus características. Dicha modelización se realiza mediante el programa informático “Hydrologic Engineering Center - River Analysis System” (HEC-RAS), el cual permite conocer para un caudal y un tramo determinados, las variables hidráulicas y geométricas necesarias para poder trabajar posteriormente en Microsoft Excel.

Para realizar la modelización hidráulica, HEC-RAS necesita disponer de la geometría del cauce, ribera y llanura de inundación además de los datos de los caudales que se van a simular. Si no se tuvieran dichos parámetros en HEC-RAS, el usuario debería obtenerlos por su propia cuenta realizando un trabajo en campo, creando manualmente la geometría del tramo fluvial e introduciendo los valores del coeficiente de la n de Manning y el caudal con el que se modelizará posteriormente.

Para la posterior ejecución de la aplicación informática en Microsoft Excel, el usuario debería utilizar un determinado caudal de diseño. Dicho caudal va a ser el **caudal generador del lecho**, ya que correspondería a la máxima avenida ordinaria y que supone el mayor caudal que podría contener el cauce (“bankfull”). La utilización de este caudal hace que el usuario se ponga del lado de la seguridad a la hora de la selección de técnicas de bioingeniería puesto que supone, para situaciones dentro de la “normalidad”, unos mayores valores de la velocidad del flujo y cortante del flujo.

Una vez establecido el tramo de estudio y el caudal proporcionado, se obtendrán los resultados de las variables que se requieren para los posteriores cálculos del proyecto (ver **figura 78** y **figura 79**). Los resultados de las variables que se van a sacar de HEC-RAS para una sección transversal de un tramo de un determinado río corresponden con:

- Los puntos de las estaciones (X) en metros.
- Las cotas (Y) en metros.
- La cota de lámina de agua (CLA) en metros.
- La pendiente del cauce o línea de energía (Se) en m/m.
- El calado máximo (D) en metros.
- El área del flujo en el cauce principal y para cada margen (A) en metros cuadrados.
- El perímetro mojado en el cauce principal y para cada margen (P) en metros.
- La distribución de velocidades en las subsecciones (V_i) en m/s.
- Coeficiente de la n de Manning (n).

Una vez recopilado estos resultados, el usuario procederá a rellenar las casillas con las variables de entrada que Microsoft Excel le facilita.

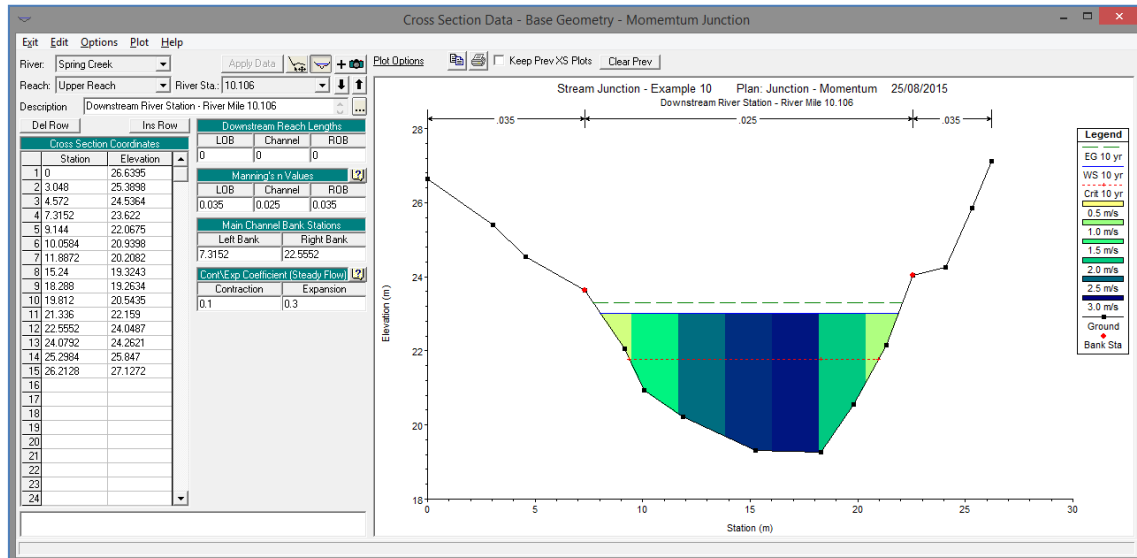



Figura 78: Ejemplo de una sección transversal con su distribución de velocidades del flujo. Fuente: HEC-RAS.



Cross Section Output

FileTypeOptionsHelp

River:Spring Creek

Profile:10 yr

ReachUpper Reach

RS:10.106

Plan:Momentum

Plan: MomentumSpring CreekUpper ReachRS: 10.106Profile: 10 yr

E.G. Elev (m)	23.30	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.28	Wt. n-Val.		0.025	
W.S. Elev (m)	23.01	Reach Len. (m)	24.38	24.38	24.38
Crit W.S. (m)	21.77	Flow Area (m2)		36.10	
E.G. Slope (m/m)	0.001231	Area (m2)		36.10	
Q Total (m3/s)	84.95	Flow (m3/s)		84.95	
Top Width (m)	13.86	Top Width (m)		13.86	
Vel Total (m/s)	2.35	Avg. Vel. (m/s)		2.35	
Max Chl Dpth (m)	3.75	Hydr. Depth (m)		2.61	
Conv. Total (m3/s)	2421.5	Conv. (m3/s)		2421.5	
Length Wtd. (m)	24.38	Wetted Per. (m)		16.63	
Min Ch El (m)	19.26	Shear (N/m2)		26.21	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	1255.01	0.00	0.00
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)		1.07	
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)			

Errors, Warnings and Notes

Figura 79: Datos correspondiente a la sección transversal de estudio de la figura 76. Fuente: HEC-RAS.

5.3. Secuencia de cálculos en Microsoft Excel

5.3.1. Entrada de variables

El primer paso una vez conseguidos los datos que se necesitan de HEC-RAS es rellenar las casillas de entrada de datos. A continuación, se explicará la función de cada parámetro para la selección final de la técnica de bioingeniería.

- 1) El usuario deberá introducir los puntos correspondientes con las estaciones (x) y las cotas (y) de toda la sección transversal así como los puntos que definen sólo la superficie mojada. Además, se deberán introducir los puntos que definen la cota de lámina de agua (CLA) y donde empiezan las márgenes y acaba el lecho o cauce principal (ver **figura 80**).

ENTRADA DE VARIABLES

Geometría de la sección transversal

Estación (x)	Cotas (y)
0	26.6395
3.048	25.3898
4.572	24.5364
7.3152	23.622
9.144	22.0675
10.0584	20.9398
11.8872	20.2082
15.24	19.3243
18.288	19.2634
19.812	20.5435
21.336	22.159
22.5552	24.0487
24.0792	24.2621
25.2984	25.847
26.2128	27.1272

Cota de lámina de agua (CLA)

Estación (x)	Cota (y)
Márgen izq.	8
Márgen der.	22

Punto donde termina el lecho

Estación (x)	Cota (y)
Márgen izq.	11.8872
Márgen der.	19.812

Geometría de la superficie mojada

Estación (x)	Cotas (y)
9.144	22.0675
10.0584	20.9398
11.8872	20.2082
15.24	19.3243
18.288	19.2634
19.812	20.5435
21.336	22.159

Figura 80: Ejemplo de la entrada de variables en la aplicación informática correspondiente con la geometría de la sección transversal que se requiera estudiar. Fuente: elaboración propia.

- 2) Seguidamente, el usuario deberá introducir los datos correspondientes a la pendiente de la línea de energía (Se), el área del flujo de la sección (A), el perímetro mojado de la sección (P), el coeficiente de Manning en el lecho o cauce principal (n), la velocidad media del flujo (V) y el radio de curvatura (Rc) (ver **figura 81**). Además, la herramienta informática da como valor predeterminado el peso específico del agua con sedimentos ($\gamma = 10.000 \text{ N/m}^3$).

Variables de entrada

Peso específico del agua con sedimentos (Y):	10000 N/m ³
Pendiente del Cauce (S):	0.001231 m/m
Área del flujo (m ²):	36.1 m ²
Perímetro mojado (m):	16.63 m
Coeficiente de Manning en el lecho (n):	0.025
Velocidad media del flujo (V):	2.35 m/s
Radio de Curvatura (Rc):	50 m

Figura 81: Ejemplo de la entrada de variables en la aplicación informática correspondiente a la sección transversal que se requiera estudiar. Fuente: elaboración propia.

- 3) La distribución de velocidades se coge directamente de HEC-RAS, sin necesidad de realizar ningún tipo de operación. Este procedimiento ya se ha descrito en el apartado **4.2. Estimación de la velocidad media del flujo.** (ver figura 82).

Velocidad del flujo (V)

Estación (x)	Velocidad media del flujo (V) en m/s
9.144	0.72
10.0584	1.81
11.8872	2.46
15.24	2.78
18.288	2.02
19.812	2.02
21.336	0.89

Figura 82: Ejemplo de la entrada de variables en la aplicación informática correspondientes con la distribución de velocidades del flujo. Fuente: elaboración propia.

- 4) Como complemento, el usuario podrá seleccionar la Región ecológica en la que se va a realizar la actuación de restauración fluvial para comprobar las especies vegetales recomendadas. Ver **Anexo II: Especies vegetales recomendadas según la región ecológica**. (ver figura 83).

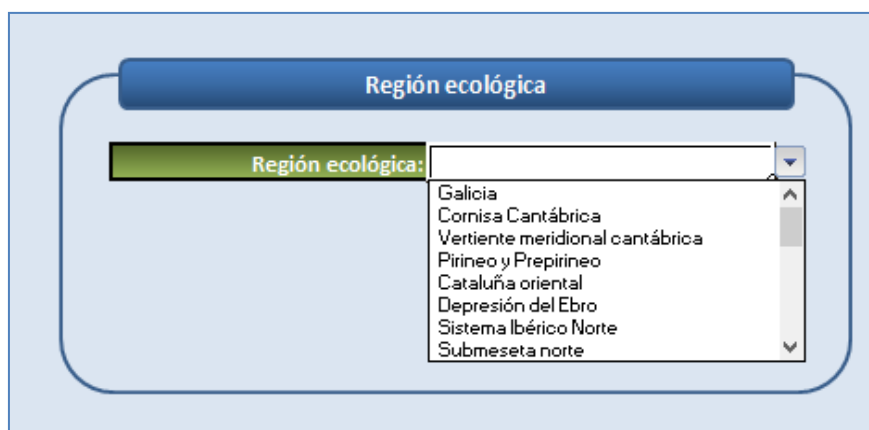


Figura 83: Entrada de variable en la aplicación informática correspondiente con la región ecológica perteneciente a la zona de estudio en la que se implanta la obra de bioingeniería. Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Cálculos realizados en la aplicación informática

Una vez introducidas todas las variables de entrada necesarias para que la aplicación informática en Microsoft Excel pueda funcionar, se proceden a realizar los cálculos oportunos para obtener los resultados acerca de la técnica de bioingeniería que más se ajusta al tramo fluvial de estudio. Seguidamente, se va a explicar detalladamente el procedimiento de cálculo que la aplicación informática ejecuta.

A través de los puntos que definen la geometría de la sección transversal (estaciones y cotas) y los demás datos de partida se van a calcular los siguientes parámetros:

- **Anchura de la superficie libre (B), en m:** es el resultado de restar el punto de la estación (x) de la margen derecha de la cota de lámina de agua (CLA) por el punto de la estación (x) de la margen izquierda de la cota de lámina de agua (CLA). (ver **ecuación nº 31**).

Ecuación 31: Anchura de la superficie libre (m).

$$B = x_{CLA \text{ margen derecha}} - x_{CLA \text{ margen izquierda}}$$

- **Distribución de calados (D_i), en m:** se calcula restando la cota de lámina de agua (CLA) por la cota (y) en cada estación (x). (ver **ecuación nº 32**).

Ecuación 32: Distribución de calados (m).

$$D_i = CLA - y_i$$

- **Calado máximo (D), en m:** se obtiene hallando el máximo en la distribución de calados (D_i). (ver **ecuación nº 33**).

Ecuación 33: Calado máximo (m).

$$D = MAX(D_i)$$

- **Radio hidráulico (R_h), en m:** es el resultado de dividir el área del flujo (A) entre el perímetro mojado (P). (ver **ecuación nº 34**).

Ecuación 34: Radio hidráulico (m).

$$R_h = \frac{A}{P}$$

- **Relación B/D :** se obtiene dividiendo la anchura de la superficie libre (B) entre el calado máximo (D).
- **Relación R_c/B :** se halla dividiendo el radio de curvatura (R_c) entre la anchura de la superficie libre (B).
- **Componente horizontal de inclinación del talud (Z):** es el resultado de calcular la fórmula aconsejada en el apartado **4.5.3. Criterios para la generalización del resultado a cauces naturales**. (ver **ecuación nº 5**). Además, calculando la cotangente de $1/Z$ se obtiene la pendiente media del talud en grados ($^\circ$), la cual será la utilizada para la posterior consulta.

A través de estos datos se calcula todo lo relativo a la obtención del cortante medio de flujo, los cortantes máximos en lecho y en talud y su distribución a lo largo de la sección transversal a través del **método nº 5** que aparece en el apartado **4.7.2. Descripción de métodos para el cálculo de los cortantes del flujo**.

5.3.3. Resultados obtenidos para la selección de técnicas de bioingeniería

Realizados los cálculos, la aplicación informática ofrece al usuario los resultados de todos éstos y, posteriormente, se consulta la técnica de bioingeniería que más se adapte a dichos resultados.

En primer lugar, en las **figuras 84-90** se muestran a modo de ejemplo los resultados de las variables que la aplicación informática a través de Microsoft Excel resuelve. En cuanto a la región ecológica, no ha podido resolverse para este ejemplo puesto que el tramo fluvial no se encuentra en la península ibérica.

Resultados de la geometría de la sección transversal		
Rádío hidráulico (Rh):	2.17	m
Anchura de la superficie libre (B):	14	m
Calado máximo (D):	3.74	m
Relación B/D:	3.75	
Relación Rc/B:	0.17	
Longitud de protección (Lp):	73.12	m
Sobre-elevación adicional (Δd):	0.16	m

Figura 84: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a las variables de entrada en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.

Componente horizontal de inclinación del talud (Z)								
	X* (m)	Y* (m)	XF (m)	YF (m)	difX (m)	difY (m)	Z	Grados (°)
Margen izquierda	8	23	9.144	22.0675	1.144	0.93	1.2	39
Margen derecha	21.336	22.159	22	23	0.664	0.84	0.8	52

Figura 85: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la componente horizontal de inclinación del talud Z en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.

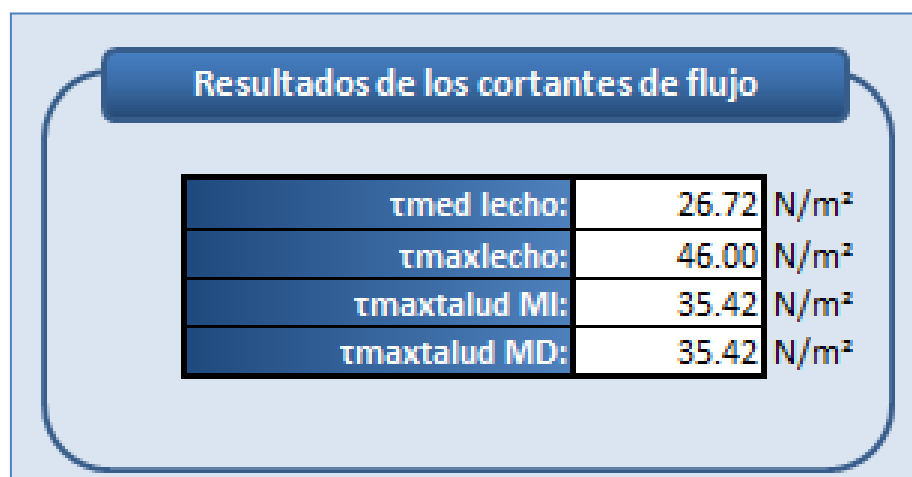


Figura 86: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes al cálculo de los diferentes cortantes del flujo en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.

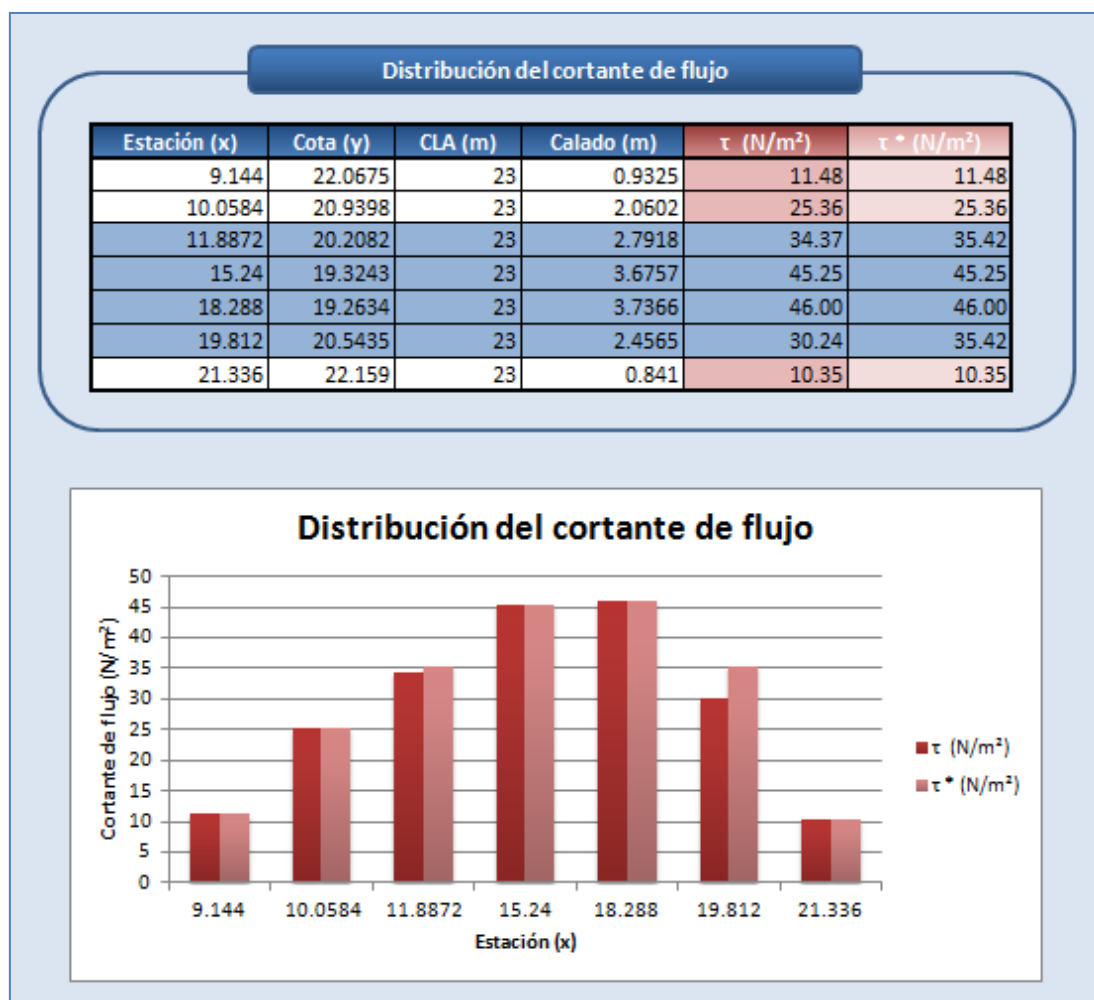


Figura 87: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la distribución de los cortantes de flujo en el cauce (azul) y márgenes y el gráfico de barras correspondiente en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.

Estación (m)	Cota (m)	CLA (m)	τ (N/m ²)	τ^* (N/m ²)
0	26.6395	23	0	0
3.048	25.3898	23	0	0
4.572	24.5364	23	0	0
7.3152	23.622	23	0	0
8	23	23	0	0
9.144	22.0675	23	11.48	11.48
10.0584	20.9398	23	25.36	25.36
11.8872	20.2082	23	34.37	35.42
15.24	19.3243	23	45.25	45.25
18.288	19.2634	23	46.00	46.00
19.812	20.5435	23	30.24	35.42
21.336	22.159	23	10.35	10.35
22	23	23	0	0
22.5552	24.0487	23	0	0
24.0792	24.2621	23	0	0
25.2984	25.847	23	0	0
26.2128	27.1272	23	0	0

Figura 88: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la distribución de los cortantes de flujo a lo largo de toda la sección transversal en la aplicación informática. Las filas de color azul corresponden con el lecho Fuente: elaboración propia.

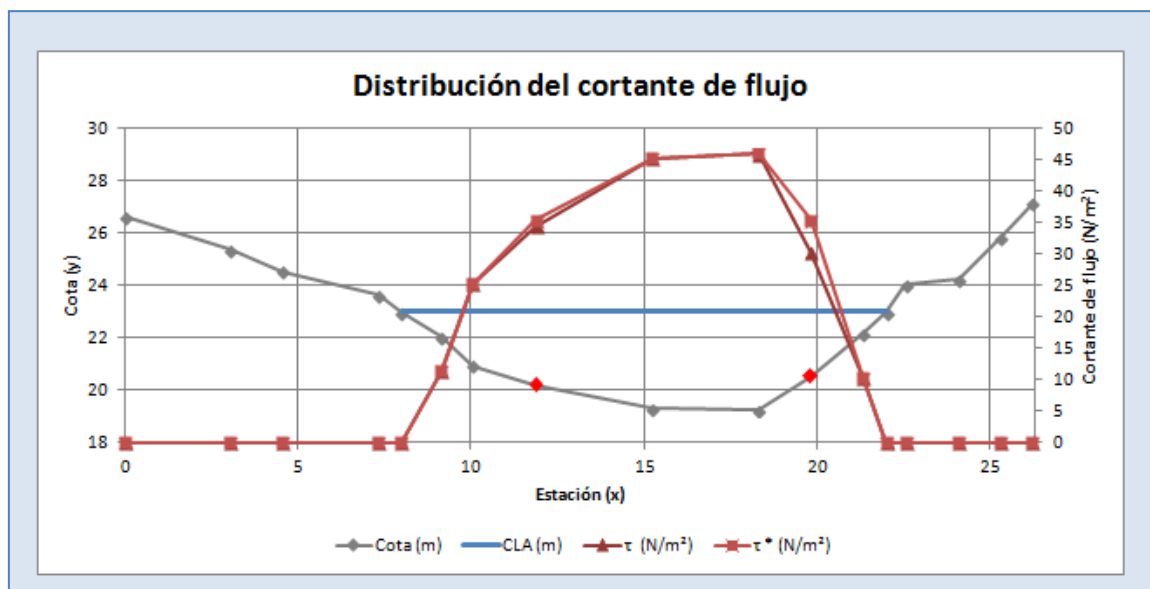
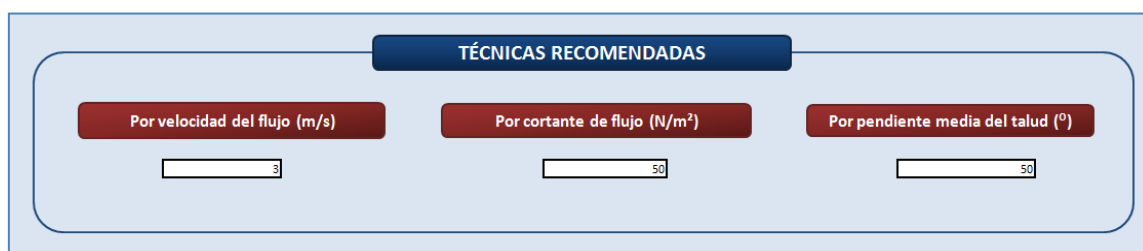


Figura 89: Ejemplo de los resultados obtenidos referentes a la distribución de los cortantes de flujo en una gráfica de dispersión en la aplicación informática. Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenido los resultados de la distribución de velocidades del flujo (v_i), de la distribución de los cortantes del flujo (τ_i) y la componente horizontal de inclinación de los taludes (Z) pasada a pendiente media en grados, el usuario podrá realizar una consulta en la que introduzca los resultados obtenidos según el criterio que éste elija (ver **figura 90**). La consulta de los valores de estos tres parámetros proporcionará al usuario las técnicas de bioingeniería que más se ajustan a lo largo de la sección transversal de estudio. El usuario será el encargado de seleccionar aquellas técnicas que por motivos ecológicos, económicos o paisajísticos, considere que son las más adecuadas para el ámbito de la obra de bioingeniería.



The image shows a software interface for recommending bioengineering techniques. At the top, a dark blue button labeled 'TÉCNICAS RECOMENDADAS' is centered. Below it, within a light blue rounded rectangle, are three red buttons. The first button is 'Por velocidad del flujo (m/s)' with a text input field containing the number '3'. The second button is 'Por cortante de flujo (N/m²)' with a text input field containing the number '50'. The third button is 'Por pendiente media del talud (°)' with a text input field containing the number '50'.

Figura 90: Consulta para la selección de técnicas de bioingeniería. Fuente: elaboración propia.

Algunas de las técnicas de bioingeniería más eficaces para la estabilización estructural del cauce y las márgenes según los valores introducidos en la consulta de este ejemplo serían las siguientes:

- Revestimiento de árboles
- Fajina
- Krainer
- Plantas leñosas enraizadas
- Estaquillado
- Trasplante de rizomas
- Redes orgánicas
- Geomalla gutinada
- Trenzado
- Hilera de tocones
- Tierra armada

Para poder ver las limitaciones de cada técnica de bioingeniería así como una imagen ilustrativa ir al **Anexo I: Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería**.

5.4. Programación en Microsoft Excel

La programación creada para la consulta de la aplicación informática se ha realizado utilizando el programador de Microsoft Excel. Para ello, se ha creado una macro cuya función es la de filtrar (en la base de datos) aquellos valores de la velocidad del flujo, el cortante del flujo y la pendiente media del talud que el usuario haya introducido en la consulta. Una vez filtrados dichos valores, la macro da como resultado las técnicas de bioingeniería y sus características técnicas.

Por lo tanto, cuando el usuario introduce en la consulta los valores de los anteriores parámetros, se ejecuta un filtro en el que se escogen aquellos valores de la base de datos que son iguales o mayores a los introducidos por el usuario. Asimismo, aquellas casillas de la base de datos que se encuentran en blanco pertenecientes a un determinado parámetro, también son seleccionadas puesto que no quiere decir que no pueda implantarse según otro parámetro. La macro que se ejecuta para realizar la consulta puede verse en el **Anexo III: Programación de la macro de consulta para la aplicación informática**.

Además, se ha creado una lista desplegable en la variable de entrada correspondiente a la región ecológica en la que, seleccionada dicha región, te da como resultado las especies de plantas recomendadas. La función para implantar una lista desplegable puede encontrarse en la pestaña “Datos”, donde se procede a pulsar el botón de “Validación de datos” y seleccionar “lista” en el criterio de validación.

6. Aplicación práctica

Con el objetivo de probar la aplicación informática, se va a proceder a realizar el estudio de dos tramos fluviales de ríos españoles diferentes (el río Urumea y el río Cañamares).

1. Primeramente, se va a introducir brevemente la caracterización de los tramos de estudio además de la localización y extensión que ocupan.
2. Seguidamente, a través de los datos geométricos de los tramos fluviales obtenidos por parte de los tutores del presente proyecto, se van a crear las geometrías manualmente de los tramos en HEC-RAS y se van a introducir las variables de entrada necesarias para su modelización. Una vez ejecutada la modelización con el caudal generador del lecho, se procederá a seleccionar una determinada sección transversal para su posterior estudio en la aplicación informática creada en Microsoft Excel.
3. Para concluir, con los datos obtenidos de la modelización hidráulica en el programa HEC-RAS, en la aplicación informática se van a calcular los valores de las velocidades del flujo (V), las componentes horizontales de inclinación del talud (Z) y los cortantes del flujo (τ) necesarios para consultar las técnicas de bioingeniería que más se ajustan a dichas características de la sección transversal seleccionada. La consulta proporcionará al usuario los resultados correspondientes a las técnicas de bioingeniería y a las especies vegetales recomendadas según la región ecológica.

6.1. Aplicación práctica a un tramo del río Urumea

6.1.1. Localización y caracterización general

El tramo de estudio pertenece al río Urumea, el cual se encuentra dentro de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental (Código 17), en la cuenca del Urumea (Códigos 016016 y 015073) y cuenta con una superficie de 279 kilómetros cuadrados y una longitud del cauce de 45,5 kilómetros. En la **tabla nº 11** se reflejan datos generales sobre la localización del río Urumea y su codificación.

Nombre Demarcación Hidrográfica:	Cantábrico Oriental
Código de la Demarcación:	17
Códigos de las cuencas:	016016 y 015073
Cauce:	Urumea
Código del cauce:	00957
Tipo de corriente:	Río
Longitud del cauce:	45,5 Km

Tabla 11: Datos recogidos del geoportal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) acerca de la localización del río Urumea y su codificación. Fuente: elaboración propia.

El río Urumea nace en el Puerto de Ezkurra, en Navarra, y desemboca en Donostia/San Sebastián. Por lo tanto, limita al norte con la provincia de Guipúzcoa y al sur con la provincia de Navarra (ver **figura 91**). Su superficie se divide entre dos Comunidades Autónomas, País Vasco y Comunidad Foral de Navarra. (Confederación Hidrográfica del Cantábrico, 2015).

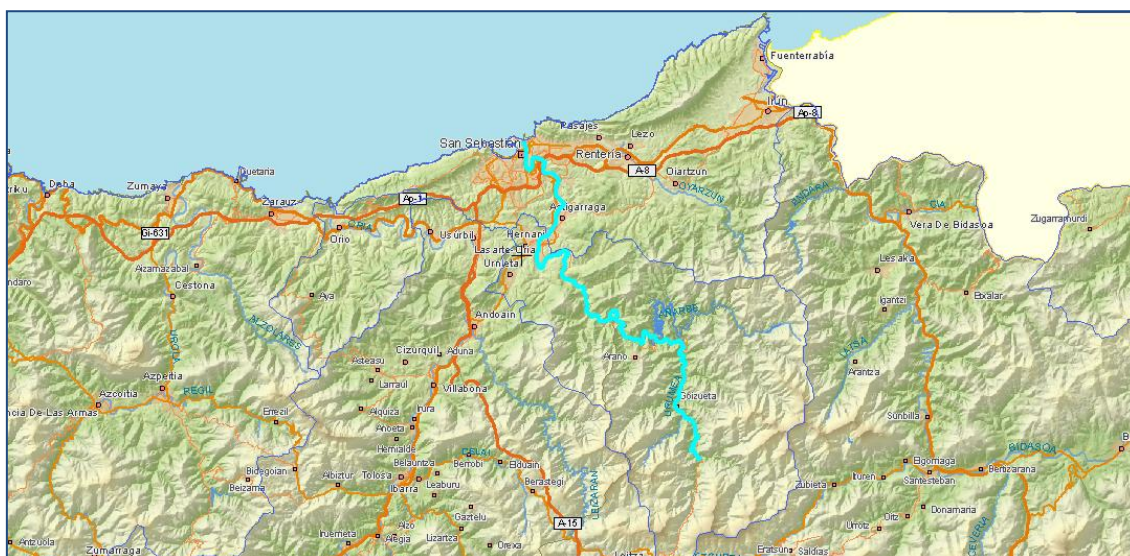


Figura 91: Mapa de localización a menor escala del río Urumea. Fuente: geoportal del MAGRAMA.

6.1.2. Modelización hidráulica mediante el programa informático HEC-RAS

El paso previo a la modelización hidráulica corresponde con la obtención de datos geométricos de un tramo del río Urumea. Para ello, se han cogido los datos de las estaciones (x), cotas (y), distancia entre secciones transversales y valores de la “n” de Manning de un tramo facilitado por los tutores del presente proyecto a través de unos datos RHYHABSIM tomados el 5 de mayo del año 2009.

Una vez recogidos estos datos, se ha procedido a crear manualmente la geometría del tramo seleccionado perteneciente al río Urumea (ver **figura 92**). Para ello, se han creado las secciones transversales individualmente, en las cuales se han introducido los valores de las estaciones (x), las cotas (y), las distancias entre las secciones, los valores de la “n” de Manning y los puntos que definen el lecho. Además, el tramo de estudio ha sido modelizado mediante un **caudal de diseño** que supone el cauce lleno “bankfull” y se ha escogido que el tramo se encuentra en **régimen lento**.

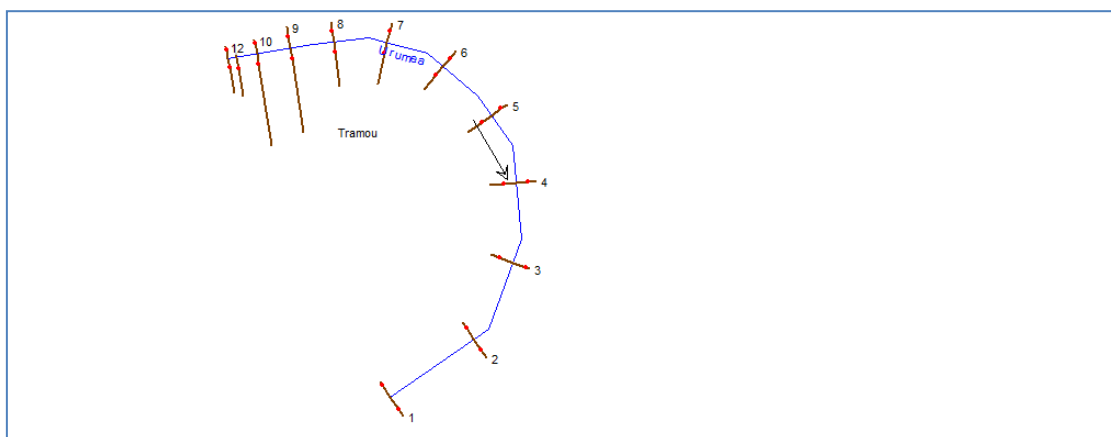


Figura 92: Geometría del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.

Una vez creada la geometría y utilizando el caudal de diseño que cumple la condición de “cauce lleno” (en este caso $Q_d = 40 \text{ m}^3/\text{s}$), HEC-RAS da como resultado las variables que se van a necesitar para la entrada de variables de la aplicación informática en Microsoft Excel.

El resultado final de la modelización se refleja en la **figura 93**, que muestra el tramo en 3D una vez realizadas todas las operaciones oportunas para su modelización y puesta en orden para la posterior aplicación informática.

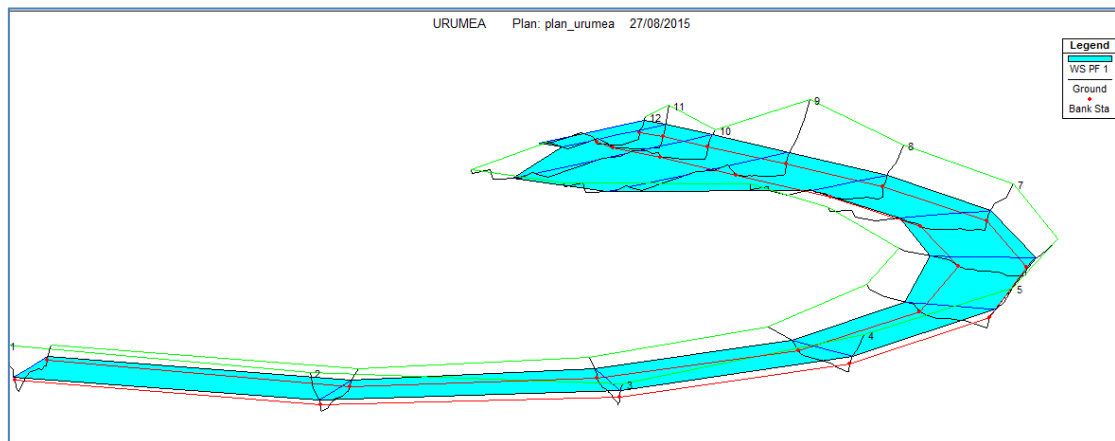


Figura 93: Geometría 3D del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

6.1.3. Cálculo de variables mediante Microsoft Excel

Posteriormente a la modelización del tramo del río Urumea, se ha procedido a calcular los parámetros necesarios para la selección final de técnicas de bioingeniería. Para ello, se han escogido las secciones 1 y 7, las cuales cuentan con distintos valores de las velocidades del flujo, los cortantes del flujo y las pendientes medias de los taludes.

Sección 1 correspondiente al tramo de estudio del río Urumea

En la **figura 94** y **figura 95** se reflejan los datos geométricos e hidráulicos pertenecientes a la **sección 1** del tramo del río Urumea. Como se ha visto anteriormente, con estos datos se procede a realizar el cálculo de las variables que son limitantes para la selección de las técnicas de bioingeniería.

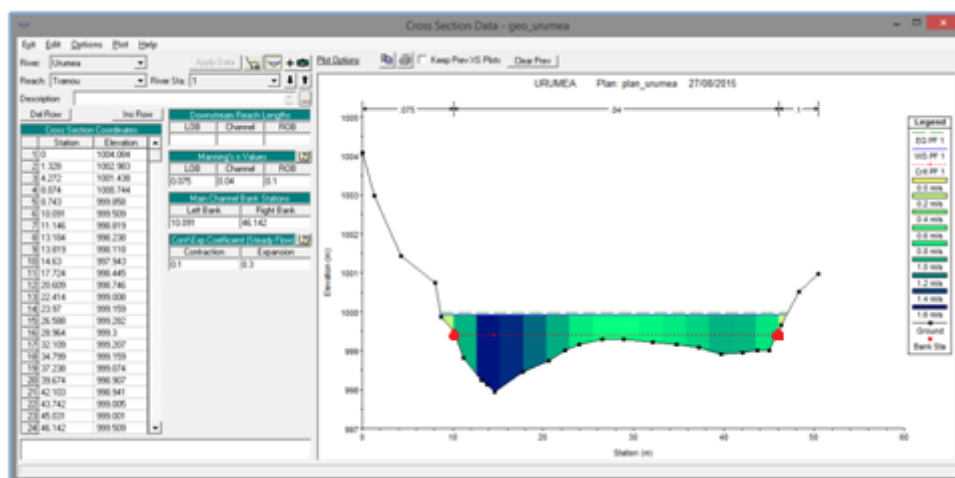


Figura 94: Sección transversal 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	Urumea	Profile:	PF 1		
Reach:	Tramou	RS:	1	Plan:	urumeap
Plan: urumeap Urumea Tramou RS: 1 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	999.98	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.06	Wt. n-Val	0.075	0.040	0.100
W.S. Elev (m)	999.92	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	999.41	Flow Area (m2)	0.32	36.03	0.15
E.G. Slope (m/m)	0.002003	Area (m2)	0.32	36.03	0.15
Q Total (m3/s)	40.00	Flow (m3/s)	0.07	39.91	0.02
Top Width (m)	38.26	Top Width (m)	1.39	36.05	0.82
Vel Total (m/s)	1.10	Avg. Vel. (m/s)	0.21	1.11	0.13
Max Chl Dpth (m)	1.97	Hydr. Depth (m)	0.23	1.00	0.18
Conv. Total (m3/s)	893.7	Conv. (m3/s)	1.5	891.8	0.4
Length Wtd. (m)		Wetted Per. (m)	1.47	36.57	0.92
Min Ch El (m)	997.94	Shear (N/m2)	4.23	19.35	3.20
Alpha	1.02	Stream Power (N/m s)	2417.55	0.00	0.00
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)			
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)			

Figura 95: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 1 del tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

Se ha escogido la **sección 1** puesto que, a la hora de la modelización, contaba con los valores de los cortantes medios de flujo más altos y, por lo tanto, se consideraba de especial atención.

El resultado que se ha obtenido una vez introducidas las variables necesarias en la aplicación informática creada en Microsoft Excel, se muestra a continuación:

- **Distribución de velocidades medias del flujo (V_i)**

La obtención de la distribución de la velocidad media del flujo, simplemente ha consistido en dividir mediante HEC-RAS la sección en tantas subsecciones como puntos de estaciones (x) contiene la superficie mojada. Este procedimiento se ha descrito anteriormente en el apartado **4.2. Estimación de la velocidad media del flujo** y puede observarse en la anterior **figura 94**. El resultado se refleja en la posterior **tabla nº 12** en la que, para cada estación (x), se proporciona un valor de la velocidad media del flujo.

Estación (x)	Velocidad media del flujo (V) en m/s
8.743	0.21
10.091	1.04
11.146	1.04
13.184	1.53
13.819	1.53
14.63	1.53
17.724	1.46
20.609	1.06
22.414	1.06
23.97	0.87
26.588	0.78
28.964	0.78
32.109	0.83
34.799	0.87
37.238	0.94
39.674	1.04
42.103	1.02
43.742	0.88
45.031	0.88
46.142	0.88
46.341	0.13

Tabla 12: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.

- **Componente horizontal de inclinación del talud (Z)**

Como se ha mencionada anteriormente en el presente proyecto, se ha realizado el cálculo de la pendiente media de cada talud mediante la componente horizontal de inclinación (Z). El resultado para cada margen se muestra en la posterior **tabla nº 13**.

Z Margen izquierda	Z Margen derecha
3,5	2,0

Tabla 13: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia.

- **Distribución de los cortantes del flujo (τ_i)**

Para la obtención de la distribución de los cortantes del flujo, primeramente se ha procedido a calcular el cortante medio del flujo, el cortante máximo del flujo en el lecho y el cortante máximo del flujo para cada talud. El resultado de dichos cálculos se muestra en la **tabla nº 14**.

Una consideración a tener en cuenta es que el tramo de estudio se encuentra en una curva. Este hecho provoca, como se ha visto anteriormente en el presente proyecto, que los valores de los cortantes del flujo sean mayores en la margen exterior de dicha curva y, por lo tanto, el cortante máximo en el lecho y el cortante máximo en el talud izquierdo en la **sección 1** se han visto incrementados. Además, a causa de la curvatura se ha calculado la longitud de protección aguas abajo de la curva (**L_p**) y la sobre-elevación adicional (**Δd**).

Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	18,77
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	79,20
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	60,98
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	30,49
Longitud de protección aguas abajo (m)	17,14
Sobre-elevación adicional (m)	0,09

Tabla 14: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen en la sección 1 del tramo del río Urumea. Además, aparece la longitud de protección y la sobre-elevación adicional. Fuente: elaboración propia.

Una vez calculados dichos parámetros se ha procedido a calcular la distribución de los cortantes del flujo a través del procedimiento anteriormente explicado en el proyecto. Para ello, se ha realizado la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo, contando con dichos valores y contando con que el tramo se encuentra en curvatura.

El la **figura 96**, se puede apreciar los tres tipos de distribuciones: en color rojo más oscuro, aparece la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes; en color rojo, la distribución teniendo en cuenta los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes; en color rojo más claro, la distribución teniendo en cuenta que el tramo se encuentra en curvatura y que la margen exterior corresponde con la margen izquierda.

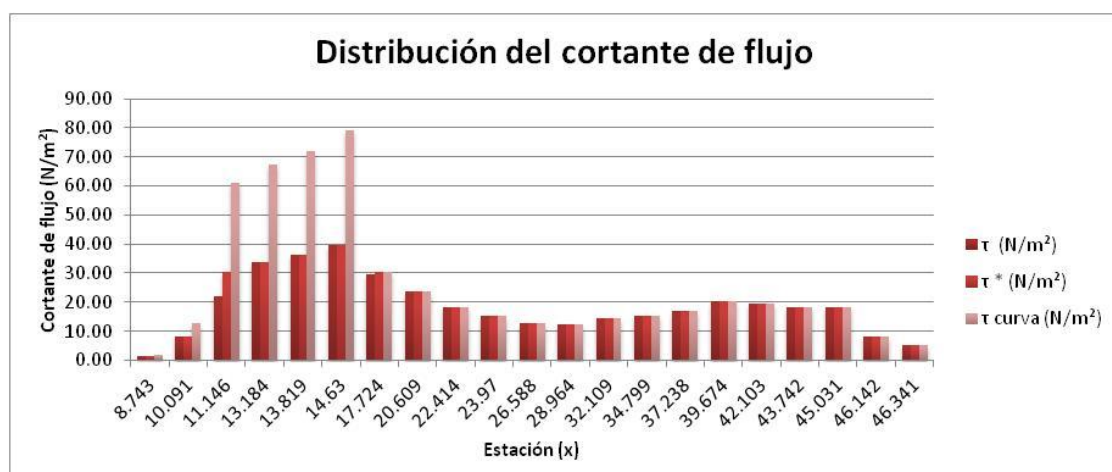


Figura 96: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.

En la **figura 97** se muestra en un gráfico de dispersión la distribución del cortante del flujo a lo largo de la sección transversal 1 para que se pueda apreciar de una forma más ilustrativa los cambios de este parámetro según la geometría de la sección. En color rojo más intenso se muestra la distribución del cortante del flujo teniendo en cuenta la curvatura y, es esta distribución, la que se elige para escoger finalmente las técnicas de bioingeniería más adecuadas.

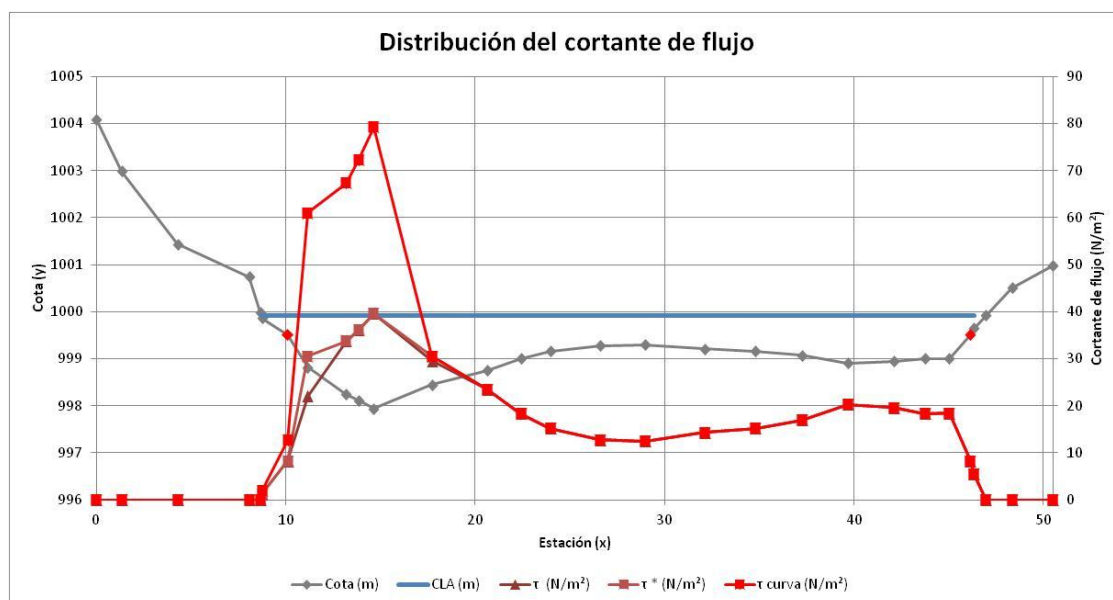


Figura 97: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.

Sección 7 correspondiente al tramo de estudio del río Urumea

Como en la sección 1, en la **figura 98** y **figura 99** se reflejan los datos geométricos e hidráulicos pertenecientes a la sección 7 del tramo del río Urumea. Como se ha visto anteriormente, con estos datos se procede a realizar el cálculo de las variables que son limitantes para la selección de las técnicas de bioingeniería. Se ha escogido la sección 7 por presentar una geometría distinta a la sección 1 y, por consiguiente, los valores de los parámetros que se buscan (velocidad del flujo, pendiente media del talud y cortantes del flujo) son diferentes.

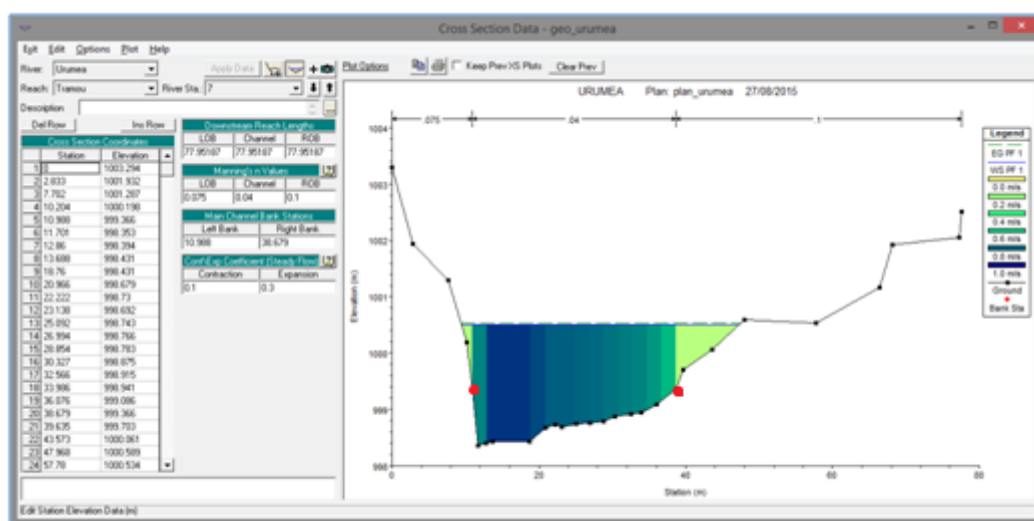



Figura 98: Sección transversal 7 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).



Cross Section Output

File

Type

Options

Help

River:

Urumea

Profile:

PF 1

Reach:

Tramou

RS:

7

↓

↑

Plan:

urumeap

Plan: urumeap

Urumea

Tramou RS: 7

Profile: PF 1

E.G. Elev (m)	1000.54	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.03	W/t. n-Val.	0.075	0.040	0.100
W.S. Elev (m)	1000.50	Reach Len. (m)	77.95	77.95	77.95
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	0.67	48.84	4.18
E.G. Slope (m/m)	0.000500	Area (m2)	0.67	48.84	4.18
Q Total (m3/s)	40.00	Flow (m3/s)	0.10	39.33	0.58
Top Width (m)	37.74	Top Width (m)	1.48	27.69	8.57
Vel Total (m/s)	0.75	Avg. Vel. (m/s)	0.15	0.81	0.14
Max Chl Dpth (m)	2.15	Hydr. Depth (m)	0.45	1.76	0.49
Conv. Total (m3/s)	1788.4	Conv. (m3/s)	4.5	1758.2	25.7
Length Wtd. (m)	77.95	Wetted Per. (m)	1.91	28.26	8.67
Min Ch El (m)	998.35	Shear (N/m2)	1.73	8.48	2.37
Alpha	1.15	Stream Power (N/m s)	3714.46	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.04	Cum Volume (1000 m3)	0.43	26.17	1.01
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	1.09	18.82	2.80

Figura 99: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 7 del tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

El resultado que se ha obtenido una vez introducidas las variables necesarias en la aplicación informática creada en Microsoft Excel, se muestra a continuación:

- **Distribución de velocidades medias del flujo (V_i)**

Como en la sección 1, el procedimiento para la estimación de la distribución de las velocidades medias del flujo se ha descrito anteriormente en el apartado **4.2. Estimación de la velocidad media del flujo** y puede observarse en la anterior **figura 98**. El resultado se refleja en la posterior **tabla nº 15** en la que, para cada estación (x), se proporciona un valor de la velocidad media del flujo.

Estación (x)	Velocidad media del flujo (V) en m/s
10.204	0.15
10.988	0.15
11.701	0.74
12.86	0.74
13.688	0.9
18.76	0.9
20.966	0.86
22.222	0.82
23.138	0.82
25.092	0.8
26.994	0.8
28.854	0.78
30.327	0.78
32.566	0.76
33.986	0.74
36.076	0.7
38.679	0.64
39.635	0.14
43.573	0.14

Tabla 15: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.

- **Componente horizontal de inclinación del talud (Z)**

Como se ha mencionada anteriormente en el presente proyecto, se ha realizado el cálculo de la pendiente media de cada talud mediante la componente horizontal de inclinación (Z). El resultado para cada margen se muestra en la posterior **tabla nº 16**.

Z Margen izquierda	Z Margen derecha
1,3	7,8

Tabla 16: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea. Fuente: elaboración propia.

- **Distribución de los cortantes del flujo (τ)**

Como en la sección 1, para la obtención de la distribución de los cortantes del flujo, primeramente se ha procedido a calcular el cortante medio del flujo, el cortante máximo del flujo en el lecho y el cortante máximo del flujo para cada talud. El resultado de dichos cálculos se muestra en la **tabla nº 17**.

Además, el cortante máximo en el lecho y el cortante máximo en el talud izquierdo en la **sección 7** también se han visto incrementados a causa de que el tramo se encuentra en curvatura y se ha calculado la longitud de protección aguas abajo de la curva (**Lp**) y la sobre-elevación adicional (**Δd**).

Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	6,91
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	21,47
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	16,24
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	8,27
Longitud de protección aguas abajo (m)	26,99
Sobre-elevación adicional (m)	0,03

Tabla 17: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen correspondientes a la sección 7 del tramo de estudio del río Urumea. Además, aparece la longitud de protección y la sobre-elevación adicional. Fuente: elaboración propia.

Una vez calculados dichos parámetros se ha procedido a calcular la distribución de los cortantes del flujo a través del procedimiento anteriormente explicado en el proyecto. Para ello, se ha realizado la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en talud, contando con dichos valores y contando con que el tramo se encuentra en curvatura.

En la **figura 100**, se puede apreciar los tres tipos de distribuciones: en color rojo más oscuro, aparece la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes; en color rojo, la distribución teniendo en cuenta los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes; en color rojo más claro, la distribución teniendo en cuenta que el tramo se encuentra en curvatura y que la margen exterior corresponde con la margen izquierda.

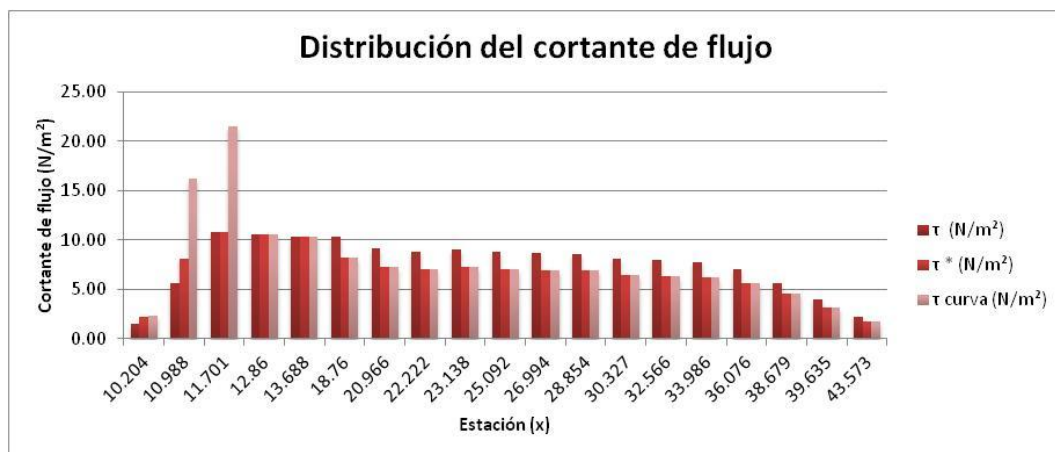


Figura 100: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.

En la **figura 101** se muestra en un gráfico de dispersión la distribución del cortante del flujo a lo largo de la sección transversal 7. En color rojo más intenso se muestra la distribución del cortante del flujo teniendo en cuenta la curvatura y, es esta distribución, la que se elige para escoger finalmente las técnicas de bioingeniería más adecuadas.

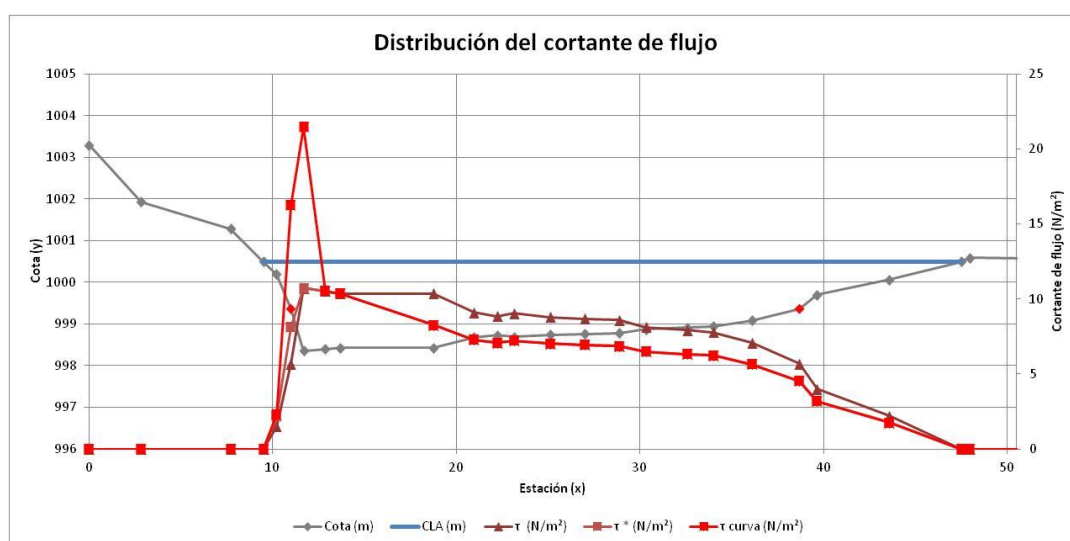


Figura 101: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.

6.1.4. Resultados

A la vista de los resultados de los cálculos realizados para la **sección 1** y la **sección 7** del tramo de estudio perteneciente al río Urumea, se ha procedido a realizar la consulta para conocer el listado de las técnicas de bioingeniería que más se ajustan a las características de dichas secciones. Para poder ver las limitaciones de cada técnica de bioingeniería así como una imagen ilustrativa ir al **Anexo I: Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería**.

La consulta en la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea

- **Velocidad del flujo:** en cuanto a las velocidades del flujo, una vez obtenida la distribución de velocidades, se puede apreciar que no se superan los 2 m/s en ningún punto de la sección con el caudal de diseño que se ha determinado ($Q_d = 40 \text{ m}^3/\text{s}$). Por lo tanto, prácticamente podría utilizarse cualquier técnica de bioingeniería que se quiera, salvo la malla de yute, la malla de paja o la fibra de malla de coco. Además, el uso de un deflector tampoco tendría éxito según la base de datos creada en la aplicación informática del presente proyecto.
- **Pendiente media de talud izquierdo:** el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 3.5$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Pendiente media del talud derecho:** al igual que para el talud izquierdo, el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 2.0$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Cortante del flujo:** en cuanto al cortante del flujo, se ha procedido a formar **cuatro** subsecciones para agrupar los distintos rangos de valores de este parámetro (ver **figura 102**).
 - **Subsección 1:** el valor del cortante del flujo es igual a cero ya que no presenta superficie mojada. En esta subsección podría implantarse cualquier tipo de bioingeniería según la modelización hidráulica realizada anteriormente. Como solución, se ha propuesto el uso de la técnica de ingeniería naturalística que corresponde con un estaquillado de especies de sauces pertenecientes a la zona o región ecológica.

- **Subsección 2:** los valores del cortante de flujo llegan a alcanzar los 80 N/m². En esta zona las técnicas que no recomienda la aplicación informática usar corresponden con la malla de yute, la malla de paja y la hilera de tocones. Además, habría que tener cuidado si se quiere implantar geomallas degradables, deflectores, ribaltas o fajinas. Como solución, se ha decidido utilizar un trenzado vivo para proteger la margen izquierda exterior a la curva. El trenzado vivo, es una técnica de bioingeniería que aguanta el cortante de flujo un rango de 100-150 N/m² por lo que resulta suficiente para dicha sección transversal. Además, pueden utilizarse los elementos vivos de la propia zona (especies vegetales autóctonas) por lo que la restauración fluvial sería más ecológica, estética y económica.
- **Subsección 3:** el rango de los valores del cortante del flujo oscila entre 20 y 30 N/m². Como solución se propone el uso de plantas leñosas enraizadas capaces de aguantar las velocidades del flujo y los cortantes del flujo en esta zona además de periodos de tiempo en los que podrían estar parcial o totalmente sumergidas.
- **Subsección 4:** en esta última zona el rango del cortante de flujo corresponde con 0-20 N/m². Como solución, se propone utilizar la misma técnica que en la **subsección 1**, el estaquillado de especies de sauce pertenecientes a la zona de la obra y se podría reforzar con una cobertura de ramas en la parte más baja en contacto con la superficie mojada.
- **Especies vegetales recomendadas según a región ecológica:** el río Urumea pertenece a la región ecológica “Cornisa Cantábrica” por lo que las especies recomendadas son *Salix atrocinerea*, *Alnus glutinosa*, *Corylus avellana*, *Fraxinus excelsior*, *Salix eleagnos* y *Salix purpurea*.

En la **figura 102**, se muestra a modo de diseño esquemático como resultaría la obra de bioingeniería en su conjunto. La **subsección 1** o **zona 1**, se localiza en la margen izquierda sin contacto con la superficie libre y se representa con unas estacas; la **subsección 2** o **zona 2**, se localiza en la margen izquierda del lecho coincidiendo con la margen exterior de la curva y se representa con unas estacas con troncos; la **subsección 3** o **zona 3**, se localiza en la margen derecha del lecho y se representa con una serie de plantas; la **subsección 4** o **zona 4**, se localiza en la parte más hacia la derecha de la sección y queda representada con el mismo icono que la **zona 1**.

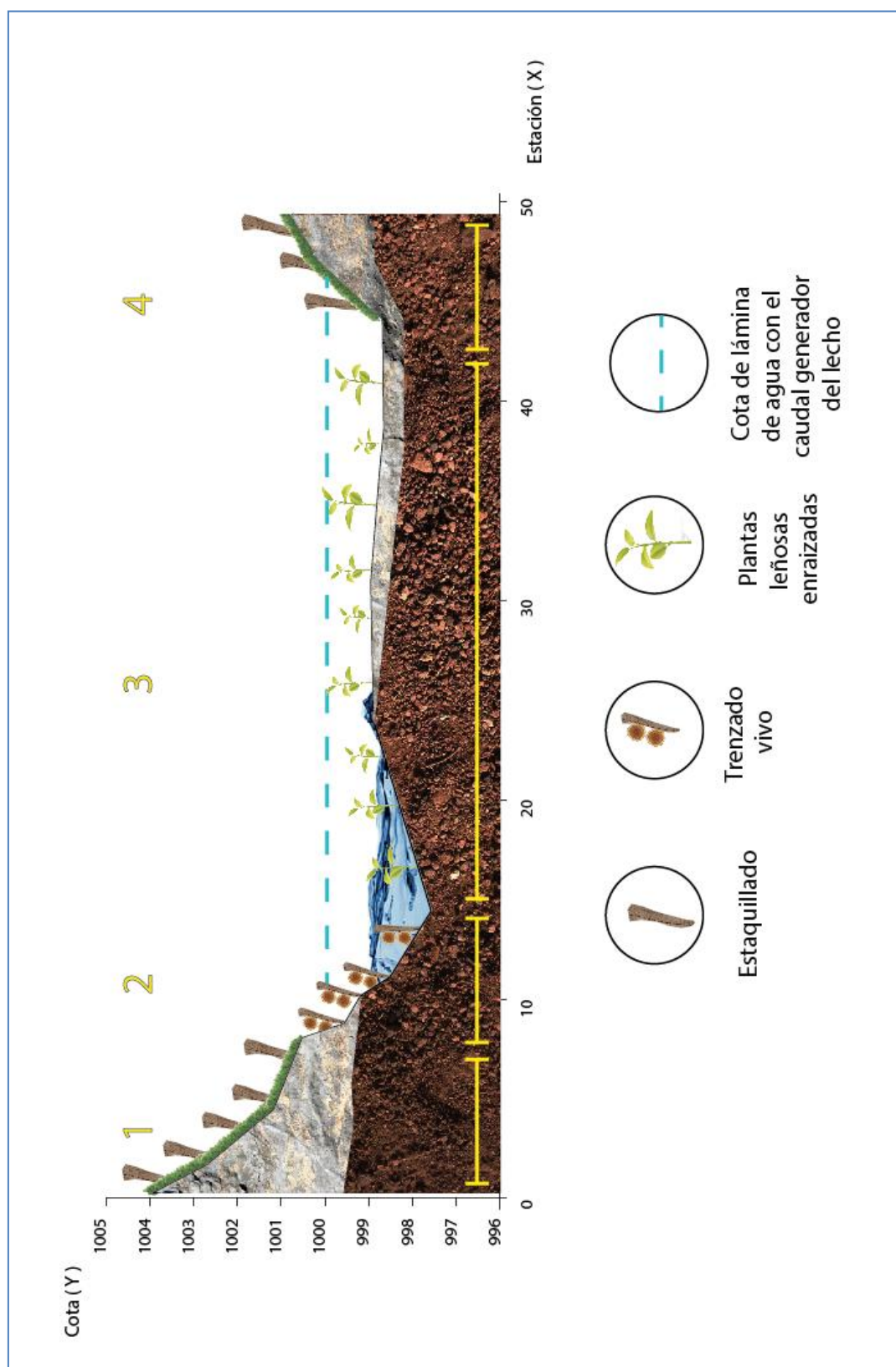


Figura 102: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.

La consulta en la sección 7 perteneciente al tramo de estudio del río Urumea

- **Velocidad del flujo:** en cuanto a las velocidades del flujo, una vez obtenida la distribución de velocidades, se puede apreciar que no se supera 1 m/s en ningún punto de la sección con el caudal de diseño que se ha determinado ($Q_d = 40 \text{ m}^3/\text{s}$). Por lo tanto, prácticamente podría utilizarse cualquier técnica de bioingeniería que se quiera.
- **Pendiente media de talud izquierdo:** el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 1.3$ y según la base de datos, para esta margen del río no sería adecuado utilizar estaquillados, cobertura de ramas, tocones enraizados, geomalla degradable...
- **Pendiente media del talud derecho:** el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 7.8$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Cortante del flujo:** en cuanto al cortante del flujo, se ha procedido a formar **cuatro** subsecciones para agrupar los distintos rangos de valores de este parámetro (ver **figura 103**).
 - **Subsección 1:** el valor del cortante del flujo es igual a cero ya que no presenta superficie mojada. En esta subsección podría implantarse cualquier tipo de bioingeniería según la modelización hidráulica realizada anteriormente. Como solución, se ha propuesto el uso de estaquillado de especies de sauces pertenecientes a la zona o región ecológica al igual que en la **sección 1** del tramo de estudio.
 - **Subsección 2:** el rango de valores del cortante de flujo va de 0 N/m^2 a 21.5 N/m^2 . Como solución, se ha propuesto el uso de la técnica de ingeniería naturalística correspondiente con la hilera de tocones o revestimiento de árboles. Además, también podría implantarse el uso de fajinas vivas. Todas estas técnicas aguantan sobradamente el esfuerzo cortante del lecho aun siendo una zona de curva exterior.
 - **Subsección 3:** el rango de los valores del cortante del flujo oscila entre 7 y 11 N/m^2 . Como solución podría utilizarse un geotextil con estaquillado de especies de sauce pertenecientes a la misma zona de la obra que soporten periodos de tiempo en los que la especie quede parcial o totalmente sumergida.

- **Subsección 4:** en esta última zona el rango del cortante de flujo corresponde con 0-7 N/m². Como solución, se propone utilizar la misma técnica que en la subsección 1, el estaquillado de especies de sauce pertenecientes a la zona de la obra pero con una especie diferente.
- **Especies vegetales recomendadas según a región ecológica:** el río Urumea pertenece a la región ecológica “Cornisa Cantábrica” por lo que las especies recomendadas son *Salix atrocinerea*, *Alnus glutinosa*, *Corylus avellana*, *Fraxinus excelsior*, *Salix eleagnos* y *Salix purpurea*.

En la **figura 103**, se muestra a modo de diseño esquemático como resultaría la obra de bioingeniería en su conjunto. La **subsección 1** o **zona 1**, se localiza en la margen izquierda sin contacto con la superficie libre y se representa con una coloración verde claro; la **subsección 2** o **zona 2**, se localiza en la margen izquierda del lecho coincidiendo con la margen exterior de la curva y se representa con una coloración marrón; la **subsección 3** o **zona 3**, se localiza en la margen derecha del lecho y se representa con una coloración verde manzana; la **subsección 4** o **zona 4**, se localiza en la parte más hacia la derecha de la sección y queda representada con el mismo tono que la **zona 1**.

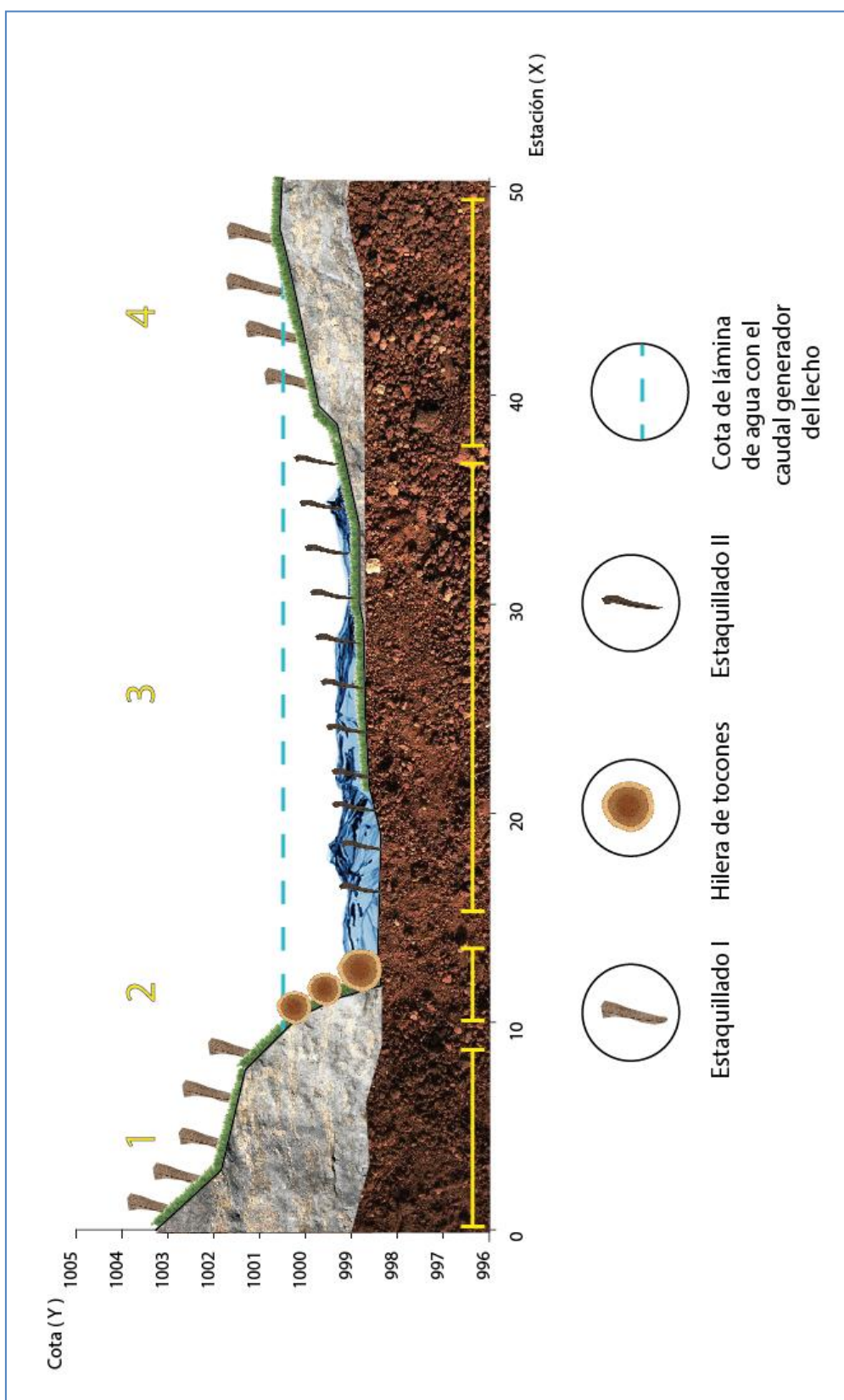


Figura 103: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 7 del tramo de estudio perteneciente al río Urumea. Fuente: elaboración propia.



6.2. Aplicación práctica a un tramo del río Cañamares

6.2.1. Localización y caracterización general

El tramo de estudio pertenece al río Cañamares, el cual se encuentra dentro de la Demarcación Hidrográfica del Tajo (Código 31), en la cuenca del Río Tajo (Código 031030) con una longitud del cauce de 45 kilómetros. En la **tabla nº 18** se reflejan datos generales sobre la localización del río Cañamares y su codificación.

Nombre Demarcación Hidrográfica:	Tajo
Código de la Demarcación:	31
Cuenca:	Río Tajo
Código de la cuenca:	031030
Subcuenca:	Cañamares
Superficie	338 m ²
Cauce:	Cañamares
Código del cauce:	06842
Tipo de corriente:	Río
Longitud del cauce:	45 Km

Tabla 18: Datos recogidos del geoportal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) acerca de la localización del río Cañamares y su codificación. Fuente: elaboración propia.

El río Cañamares pertenece a la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha, en Guadalajara. Nace en el Sistema Central cerca de Atienza y se asienta en la localidad de Cañamares y la de La Miñosa. El río Cañamares va ensanchándose por su recorrido por la Vega del Cañamares y finalmente, desemboca como afluente en el río Henares (ver **figura 104**).

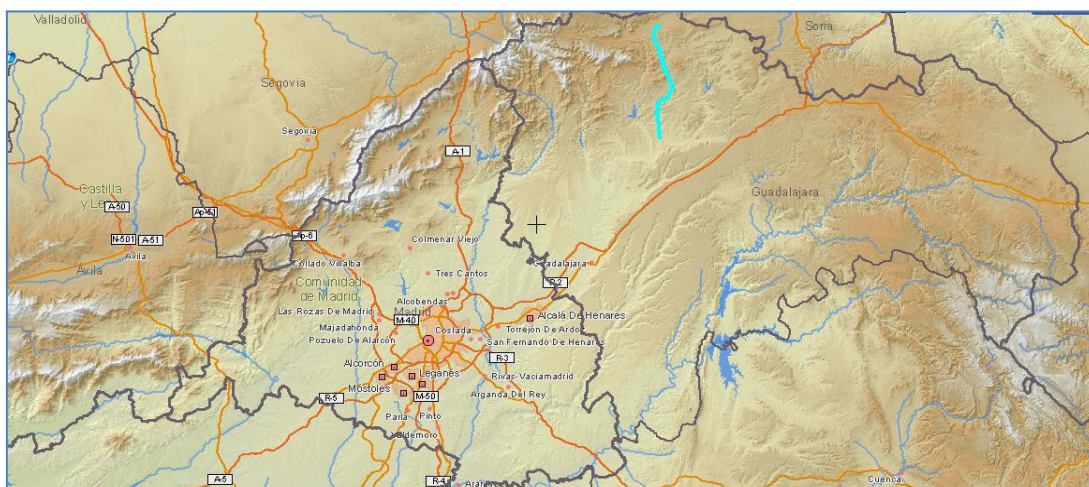


Figura 104: Mapa de localización a menor escala del río Cañamares. Fuente: geoportal del MAGRAMA.

6.2.2. Modelización hidráulica mediante el programa informático HEC-RAS

El paso previo a la modelización hidráulica corresponde con la obtención de datos geométricos de un tramo del río Cañamares. Para ello, se han cogido los datos de las estaciones (x), cotas (y), distancia entre secciones transversales y valores de la “n” de Manning de un tramo facilitado por los tutores del presente proyecto a través de unos datos RHYHABSIM tomados los días 21 y 22 de agosto del año 2008.

Una vez recogidos estos datos, se ha procedido a crear manualmente la geometría del tramo seleccionado perteneciente al río Cañamares (ver **figura 105**). Para ello, se han creado las secciones transversales individualmente, en las cuales se han introducido los valores de las estaciones (x), las cotas (y), las distancias entre las secciones, los valores de la “n” de Manning y los puntos que definen el lecho. Además, el tramo de estudio ha sido modelizado mediante un **caudal de diseño** que supone el cauce lleno “bankfull” y se ha escogido que el tramo se encuentra en **régimen lento**.

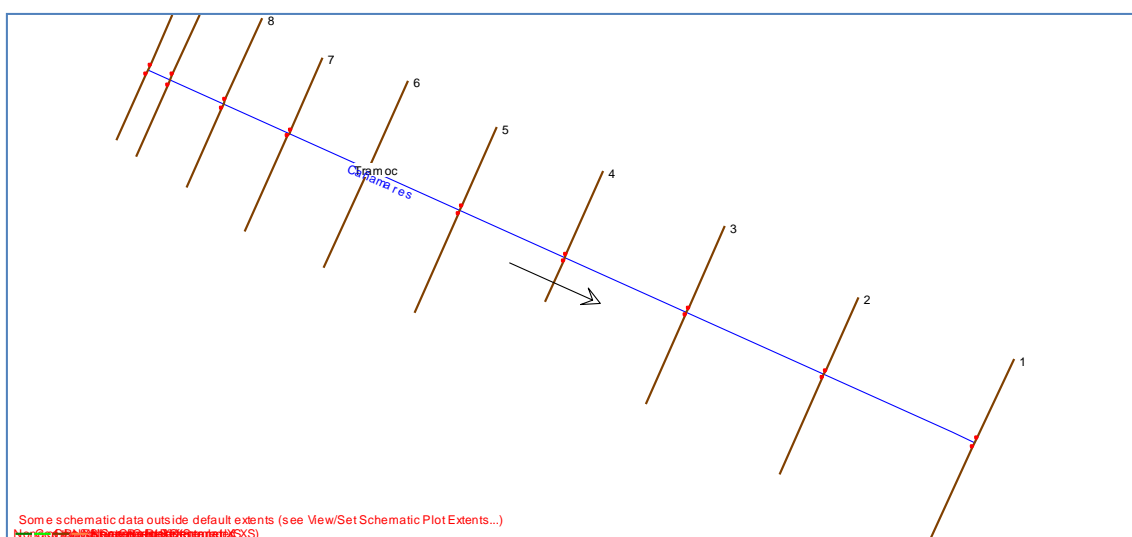


Figura 105: Geometría del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

Una vez creada la geometría y utilizando el caudal de diseño que cumple la condición de “cauce lleno” (en este caso $Q_d = 20 \text{ m}^3/\text{s}$), HEC-RAS da como resultado las variables que se van a necesitar para la entrada de variables de la aplicación informática en Microsoft Excel.

El resultado final de la modelización se refleja en la **figura 106**, que muestra el tramo en 3D una vez realizadas todas las operaciones oportunas para su modelización y puesta en orden para la posterior aplicación informática.

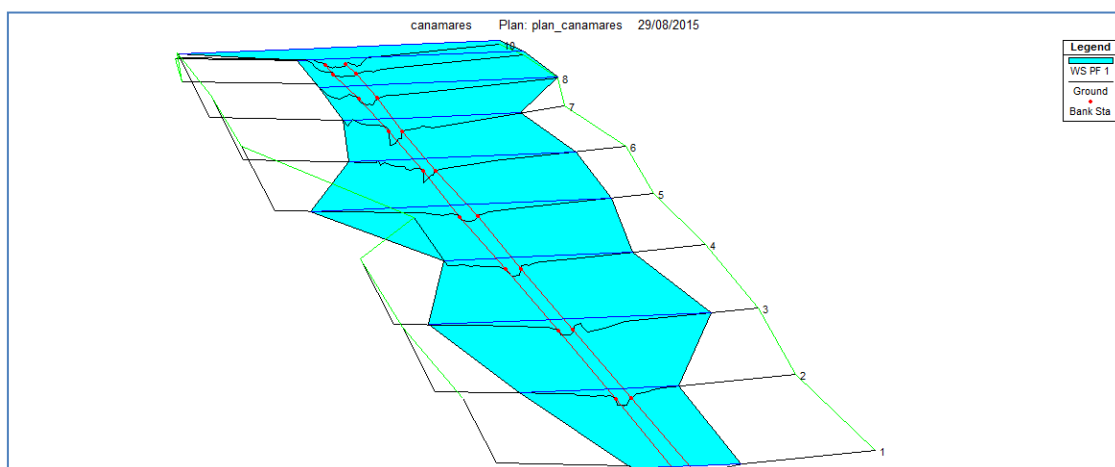


Figura 106: Geometría 3D del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

6.2.3. Cálculo de variables mediante Microsoft Excel

Posteriormente a la modelización del tramo del río Cañamares, se ha procedido a calcular los parámetros necesarios para la selección final de técnicas de bioingeniería. Para ello, se han escogido las secciones 1 y 4, las cuales cuentan con distintos valores de las velocidades del flujo, los cortantes del flujo y las pendientes medias de los taludes.

Sección 1 correspondiente al tramo de estudio del río Cañamares

En la **figura 107** y **figura 108** se reflejan los datos geométricos e hidráulicos pertenecientes a la **sección 1** del tramo del río Cañamares. Como se ha visto anteriormente, con estos datos se procede a realizar el cálculo de las variables que son limitantes para la selección de las técnicas de bioingeniería.

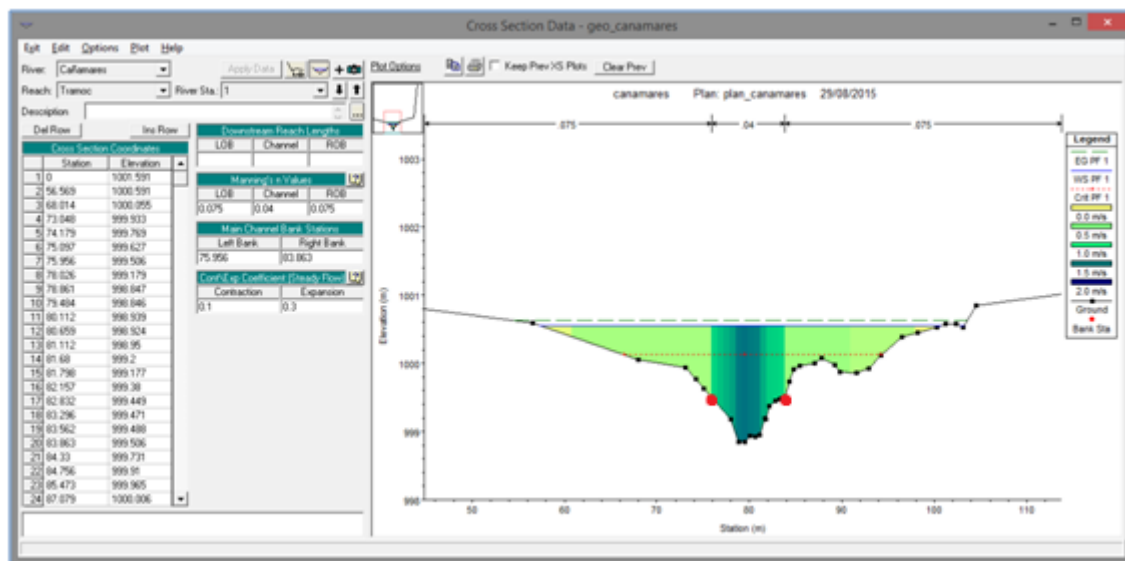


Figura 107: Sección transversal 1 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	Cañamares	Profile:	PF 1		
Reach:	Tramoc	RS:	1	Plan:	canam
Plan: canam Cañamares Tramoc RS: 1 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1000.63	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.07	Wt. n-Val.	0.075	0.040	0.075
W.S. Elev (m)	1000.56	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	1000.13	Flow Area (m ²)	7.93	10.87	7.44
E.G. Slope (m/m)	0.002002	Area (m ²)	7.93	10.87	7.44
Q Total (m ³ /s)	20.00	Flow (m ³ /s)	2.67	14.77	2.55
Top Width (m)	43.85	Top Width (m)	18.62	7.91	17.33
Vel Total (m/s)	0.76	Avg. Vel. (m/s)	0.34	1.36	0.34
Max Chl Dpth (m)	1.71	Hydr. Depth (m)	0.43	1.37	0.43
Conv. Total (m ³ /s)	447.0	Conv. (m ³ /s)	59.7	330.2	57.1
Length Wtd. (m)		Wetted Per. (m)	18.66	8.12	17.47
Min Ch El (m)	998.85	Shear (N/m ²)	8.34	26.29	8.36
Alpha	2.40	Stream Power (N/m s)	8391.46	0.00	0.00
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m ³)			
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m ²)			

Figura 108: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 1 del tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

Se ha escogido la **sección 1** puesto que, a la hora de la modelización, contaba con los valores de los cortantes medios de flujo más altos y, por lo tanto, se consideraba de especial atención.

El resultado que se ha obtenido una vez introducidas las variables necesarias en la aplicación informática creada en Microsoft Excel, se muestra a continuación:

- **Distribución de velocidades medias del flujo (V_i)**

Como en el tramo anterior, el procedimiento para la estimación de la distribución de las velocidades medias del flujo se ha descrito anteriormente en el apartado **4.2. Estimación de la velocidad media del flujo** y puede observarse en la anterior **figura 107**. El resultado se refleja en la posterior **tabla nº 19** en la que, para cada estación (x), se proporciona un valor de la velocidad media del flujo.

Estación (x)	Velocidad media del flujo (V) en m/s
68.014	0.35
73.048	0.35
74.179	0.35
75.097	0.35
75.956	0.35
78.026	1.36
78.861	1.53
79.484	1.55
80.112	1.52
80.659	1.5
81.112	1.5
81.68	1.32
81.798	1.32
82.157	1.19
82.832	1.18
83.296	1.15
83.562	1.15
83.863	1.15
84.33	0.38
84.756	0.38
85.473	0.38
87.079	0.38
87.809	0.38
89.266	0.38
89.788	0.38
91.596	0.38
92.934	0.3
94.241	0.3
96.519	0.3
98.237	0.3
100.292	0.08

Tabla 19: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

- **Componente horizontal de inclinación del talud (Z)**

Como se ha mencionada anteriormente en el presente proyecto, se ha realizado el cálculo de la pendiente media de cada talud mediante la componente horizontal de inclinación (Z). El resultado para cada margen se muestra en la posterior **tabla nº 20**.

Z Margen izquierda	Z Margen derecha
17,7	16,0

Tabla 20: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

- **Distribución de los cortantes del flujo (τ_i)**

Para la obtención de la distribución de los cortantes del flujo, primeramente se ha procedido a calcular el cortante medio del flujo, el cortante máximo del flujo en el lecho y el cortante máximo del flujo para cada talud. El resultado de dichos cálculos se muestra en la **tabla nº 21**.

Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	11,87
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	34,31
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	34,31
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	34,31

Tabla 21: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

Una vez calculados dichos parámetros se ha procedido a calcular la distribución de los cortantes del flujo a través del procedimiento anteriormente explicado en el proyecto. Para ello, se ha realizado la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes y contando con dichos valores. En este caso, el tramo no se encuentra en curvatura por lo tanto la distribución extra que se ha realizado en el anterior tramo (río Urumea) no tiene sentido realizarla.

El la **figura 109**, se puede apreciar los dos tipos de distribuciones: en color rojo más oscuro, aparece la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes; en color rojo más claro, la distribución teniendo en cuenta los valores máximos de los cortantes del flujo.

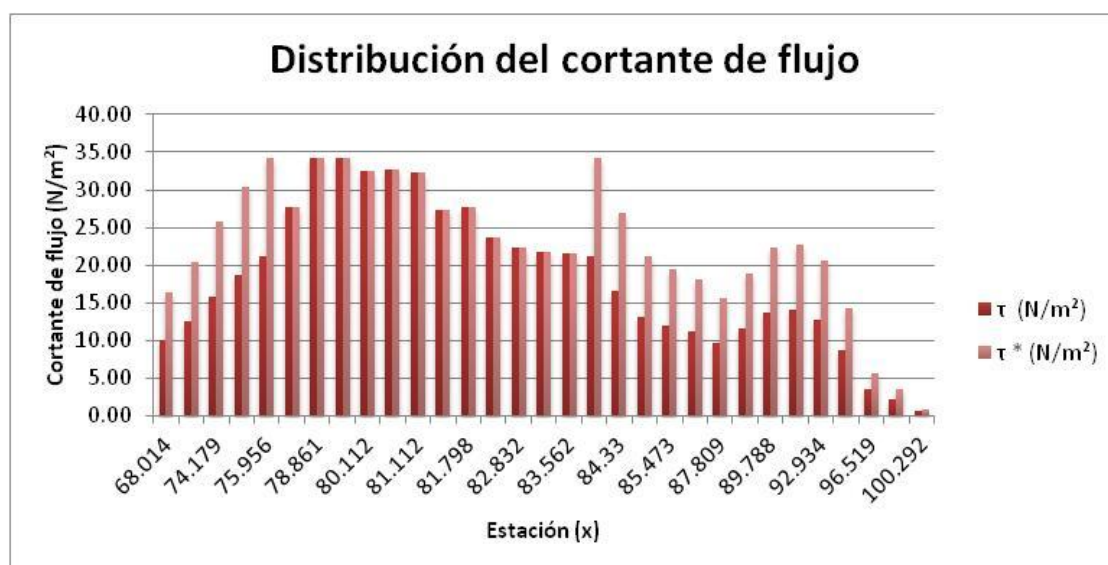


Figura 109: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

En la **figura 110** se muestra en un gráfico de dispersión la distribución del cortante del flujo a lo largo de la sección transversal 1 para que se pueda apreciar de una forma más ilustrativa los cambios de este parámetro según la geometría de la sección. En color rojo más claro se muestra la distribución del cortante del flujo teniendo en cuenta los valores máximos del cortante del flujo en las márgenes y, es esta distribución, la que se elige para escoger finalmente las técnicas de bioingeniería más adecuadas.

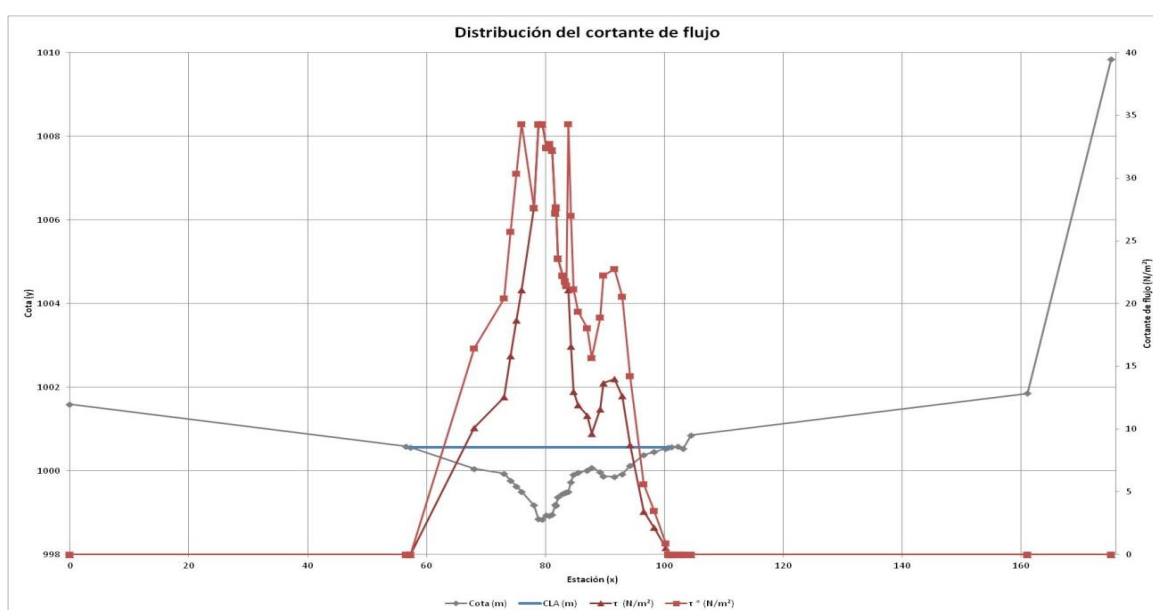


Figura 110: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.

Sección 4 correspondiente al tramo de estudio del río Cañamares

En la **figura 111** y **figura 112** se reflejan los datos geométricos e hidráulicos pertenecientes a la **sección 4** del tramo del río Cañamares. Como se ha visto anteriormente, con estos datos se procede a realizar el cálculo de las variables que son limitantes para la selección de las técnicas de bioingeniería.

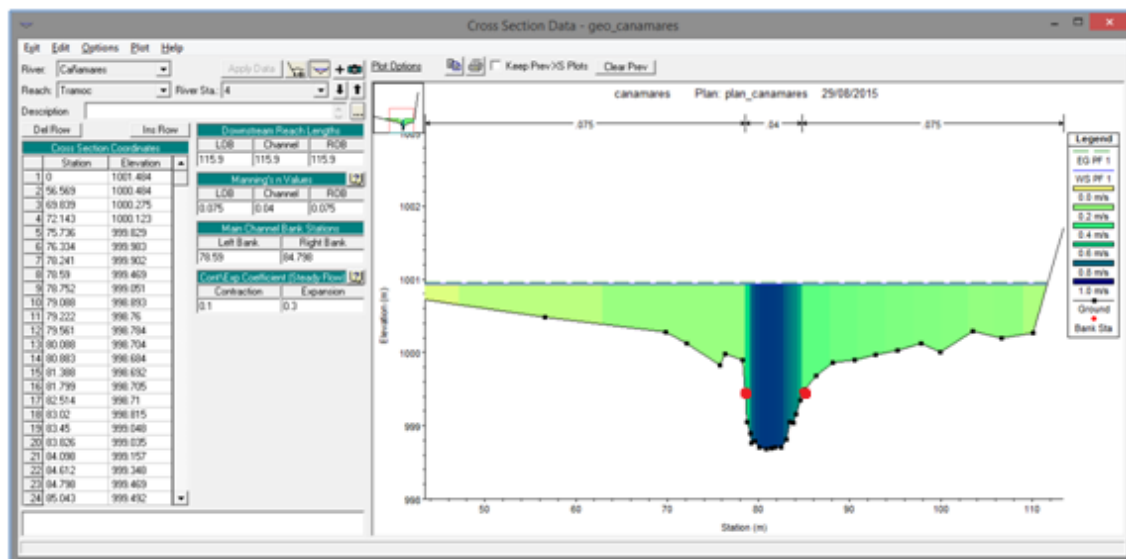


Figura 111: Sección transversal 4 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Datos geométricos y distribución de la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	Cañamares	Profile:	PF 1		
Reach:	Tramoc	RS:	4	Plan:	canam
Plan: canam Cañamares Tramoc RS: 4 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1000.96	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.02	Wt. n-Val.	0.075	0.040	0.075
W.S. Elev (m)	1000.94	Reach Len. (m)	115.90	115.90	115.90
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	21.40	12.88	23.37
E.G. Slope (m/m)	0.000449	Area (m2)	21.40	12.88	23.37
Q Total (m3/s)	20.00	Flow (m3/s)	3.53	10.48	5.99
Top Width (m)	80.80	Top Width (m)	47.76	6.21	26.83
Vel Total (m/s)	0.35	Avg. Vel. (m/s)	0.16	0.81	0.26
Max Chl Dpth (m)	2.26	Hydr. Depth (m)	0.45	2.07	0.87
Conv. Total (m3/s)	944.2	Conv. (m3/s)	166.5	494.8	282.9
Length Wtd. (m)	115.90	Wetted Per. (m)	48.01	6.76	27.01
Min Ch El (m)	998.68	Shear (N/m2)	1.96	8.38	3.81
Alpha	3.09	Stream Power (N/m s)	5945.81	0.00	0.00
Frictn Loss (m)	0.05	Cum Volume (1000 m3)	7.50	4.64	7.89
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	14.11	2.61	15.29

Figura 112: Datos hidráulicos y geométricos correspondientes a la sección 4 del tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia (HEC-RAS).

El resultado que se ha obtenido una vez introducidas las variables necesarias en la aplicación informática creada en Microsoft Excel, se muestra a continuación:

- **Distribución de velocidades medias del flujo (V_i)**

Como en el tramo anterior, el procedimiento para la estimación de la distribución de las velocidades medias del flujo se ha descrito anteriormente en el apartado **4.2. Estimación de la velocidad media del flujo** y puede observarse en la anterior **figura 111**. El resultado se refleja en la posterior **tabla nº 22** en la que, para cada estación (x), se proporciona un valor de la velocidad media del flujo.

Estación (x)	Velocidad media del flujo (V) en m/s
56.569	0.13
69.839	0.2
72.143	0.2
75.736	0.2
76.334	0.2
78.241	0.2
78.59	0.2
78.752	0.57
79.088	0.57
79.222	0.81
79.561	0.81
80.088	0.87
80.883	0.89
81.388	0.89
81.799	0.89
82.514	0.88
83.02	0.88
83.45	0.81
83.826	0.77
84.098	0.74
84.612	0.74
84.798	0.66
85.043	0.66
86.32	0.32
88.153	0.32
90.549	0.28
92.813	0.28
95.258	0.27
97.798	0.25
99.882	0.25
103.433	0.21
106.596	0.22
110.045	0.16

Tabla 22: Resultados referentes a la distribución de la velocidad media del flujo a lo largo de la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

- **Componente horizontal de inclinación del talud (Z)**

Como se ha mencionada anteriormente en el presente proyecto, se ha realizado el cálculo de la pendiente media de cada talud mediante la componente horizontal de inclinación (Z). El resultado para cada margen se muestra en la posterior **tabla nº 23**.

Z Margen izquierda	Z Margen derecha
31,5	18,0

Tabla 23: Resultado referente a la pendiente media de los taludes de la sección 4 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

- **Distribución de los cortantes del flujo (τ)**

Para la obtención de la distribución de los cortantes del flujo, primeramente se ha procedido a calcular el cortante medio del flujo, el cortante máximo del flujo en el lecho y el cortante máximo del flujo para cada talud. El resultado de dichos cálculos se muestra en la **tabla nº 24**.

Cortante medio del flujo, τ (N/m ²)	3,17
Cortante máximo del flujo en el lecho, τ máx. en lecho (N/m ²)	8,42
Cortante máximo del flujo en el talud izquierdo, τ máx. en talud izq. (N/m ²)	8,42
Cortante máximo del flujo en el talud derecho, τ máx. en talud der. (N/m ²)	8,42

Tabla 24: Resultados referentes al cortante medio del flujo, al cortante máximo del lecho en curva y a los cortantes máximos del flujo para cada margen en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

Una vez calculados dichos parámetros se ha procedido a calcular la distribución de los cortantes del flujo a través del procedimiento anteriormente explicado en el proyecto. Para ello, se ha realizado la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes y contando con dichos valores. En este caso, el tramo no se encuentra en curvatura por lo tanto la distribución extra que se ha realizado en el anterior tramo (río Urumea) no tiene sentido realizarla.

El la **figura 113**, se puede apreciar los dos tipos de distribuciones: en color rojo más oscuro, aparece la distribución sin contar con los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes; en color rojo más claro, la distribución teniendo en cuenta los valores máximos de los cortantes del flujo en las márgenes.

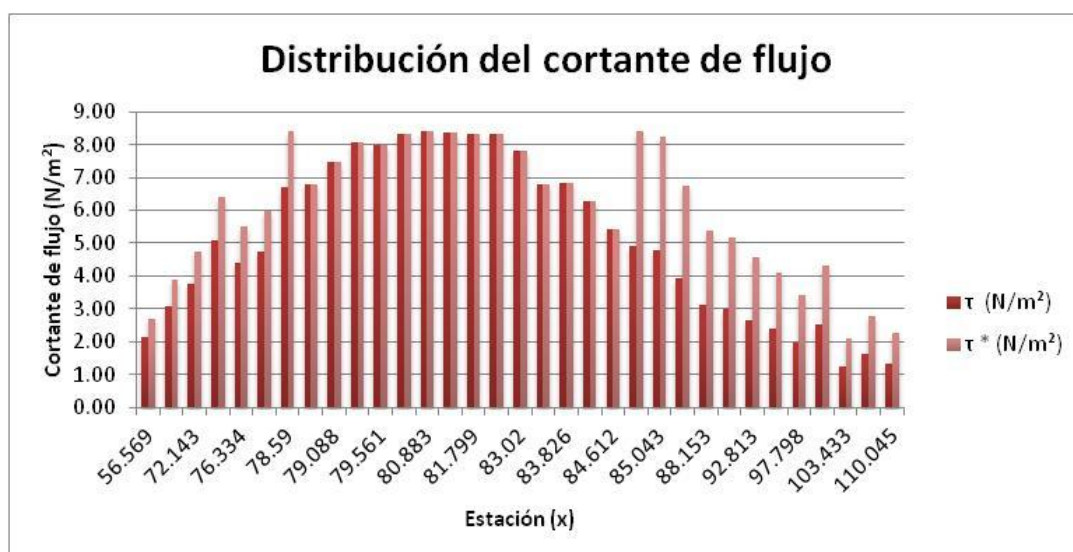


Figura 113: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

En la **figura 114** se muestra en un gráfico de dispersión la distribución del cortante del flujo a lo largo de la sección transversal 4 para que se pueda apreciar de una forma más ilustrativa los cambios de este parámetro según la geometría de la sección. En color rojo más claro se muestra la distribución del cortante del flujo teniendo en cuenta los valores máximos del cortante del flujo en las márgenes y, es esta distribución, la que se elige para escoger finalmente las técnicas de bioingeniería más adecuadas.

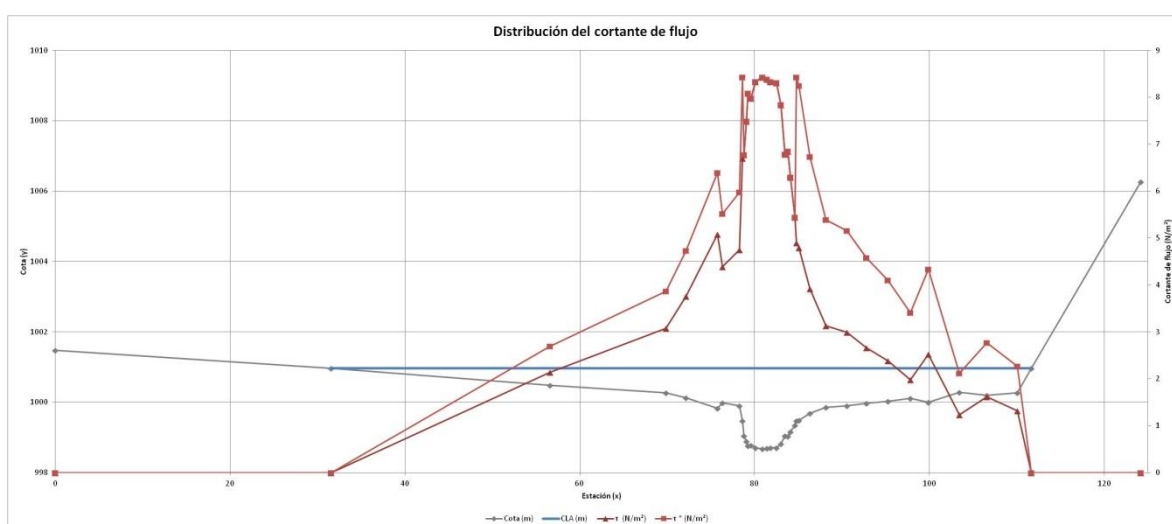


Figura 114: Resultados de la distribución de los cortantes del flujo en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares mediante un gráfico de dispersión. Fuente: elaboración propia.

6.2.4. Resultados

A la vista de los resultados de los cálculos realizados para la **sección 1** y la **sección 4** del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares, se ha procedido a realizar la consulta para conocer el listado de las técnicas de bioingeniería que más se ajustan a las características de dichas secciones. Para poder ver las limitaciones de cada técnica de bioingeniería así como una imagen ilustrativa ir al **Anexo I: Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería**.

La consulta en la sección 1 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares

- **Velocidad del flujo:** en cuanto a las velocidades del flujo, una vez obtenida la distribución de velocidades, se puede apreciar que no se superan los 2 m/s en ningún punto de la sección con el caudal de diseño que se ha determinado ($Q_d = 20 \text{ m}^3/\text{s}$). Por lo tanto, prácticamente podría utilizarse cualquier técnica de bioingeniería que se quiera, salvo la malla de yute, la malla de paja o la fibra de malla de coco. Además, el uso de un deflector tampoco tendría éxito según la base de datos creada en la aplicación informática del presente proyecto.
- **Pendiente media de talud izquierdo:** el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 17.7$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Pendiente media del talud derecho:** al igual que para el talud izquierdo, el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 16.0$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Cortante del flujo:** en cuanto al cortante del flujo, se ha procedido a formar **tres** subsecciones para agrupar los distintos rangos de valores de este parámetro (ver **figura 115**).
 - **Subsección 1:** el rango de los valores del cortante de flujo va de 0 a 20 N/m^2 . Como solución, se ha propuesto realizar trasplantes de rizomas de plantas silvestres que puedan quedar sumergidas durante un periodo de tiempo determinado puesto que realiza una cobertura del terreno más rápida que con la siembra.

- **Subsección 2:** el rango de valores del cortante de flujo va de 15 N/m² a 35 N/m². Como solución, se ha propuesto el uso de ribaltas a ambos márgenes del lecho con el objetivo de ponerse en el lado de la seguridad y poder recuperar las márgenes de la posible erosión causada.
- **Subsección 3:** el rango de los valores del cortante del flujo oscila entre 0 y 23 N/m². Como solución, se ha propuesto el uso de plantas leñosas enrizadas que puedan quedar sumergidas parcial o totalmente durante un periodo de tiempo determinado.
- **Especies vegetales recomendadas según a región ecológica:** el río Cañamares pertenece a la región ecológica “Sierra hercínicas” por lo que las especies recomendadas son *Salix atrocinerea*, *Salix salviifolia*, *Fraxinus angustifolia*, *Alnus glutinosa* y *Prunus lusitanica*.

En la **figura 115**, se muestra a modo de diseño esquemático como resultaría la obra de bioingeniería en su conjunto. La **subsección 1 o zona 1**, se localiza en la margen izquierda y se representa con una coloración verde; la **subsección 2 o zona 2**, se localiza en el lecho del cauce y se representa con una coloración morada; la **subsección 3 o zona 3**, se localiza en la margen derecha del lecho y se representa con una coloración verde manzana.

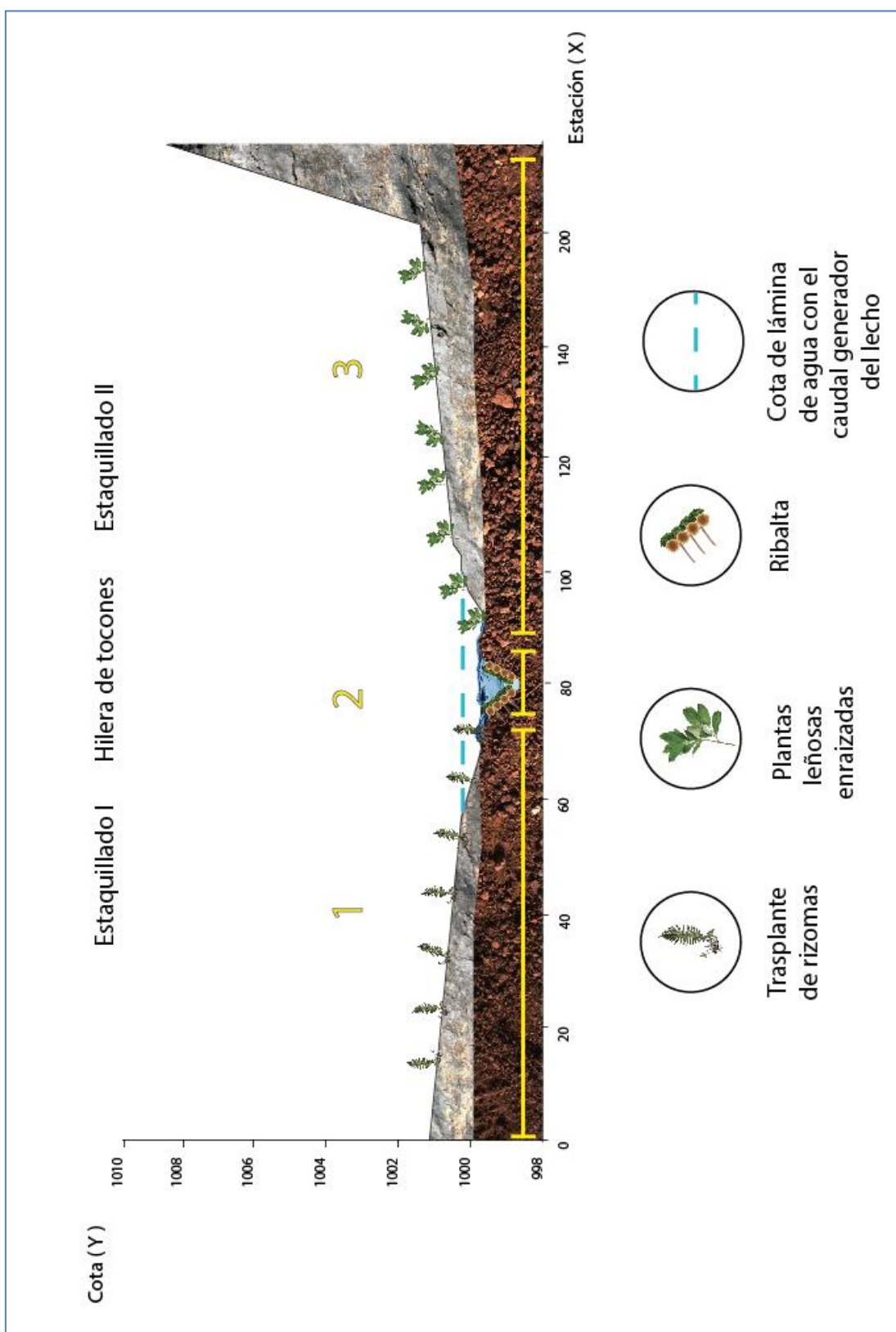


Figura 115: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 1 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

La consulta en la sección 4 perteneciente al tramo de estudio del río Cañamares

- **Velocidad del flujo:** en cuanto a las velocidades del flujo, una vez obtenida la distribución de velocidades, se puede apreciar que no se supera 1 m/s en ningún punto de la sección con el caudal de diseño que se ha determinado ($Q_d = 20 \text{ m}^3/\text{s}$). Por lo tanto, prácticamente podría utilizarse cualquier técnica de bioingeniería que se quiera.
- **Pendiente media de talud izquierdo:** el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 31.5$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Pendiente media del talud derecho:** al igual que para el talud izquierdo, el resultado obtenido ha resultado ser $Z = 18.0$ y según la base de datos, cualquier técnica de bioingeniería podría utilizarse si se tuviera en cuenta sólo la pendiente media del talud.
- **Cortante del flujo:** en cuanto al cortante del flujo, se ha procedido a formar **tres** subsecciones para agrupar los distintos rangos de valores de este parámetro (ver **figura 116**).
 - **Subsección 1:** el rango de valores del cortante de flujo oscila entre 0-7 N/m^2 . Como solución, se ha propuesto realizar, al igual que en la **sección 1**, el uso de trasplantes de rizomas de especies silvestres.
 - **Subsección 2:** el rango de valores del cortante de flujo va de 5 N/m^2 a 9 N/m^2 . Como solución, se ha propuesto el uso de fajinas vivas al tener unos valores de este parámetro más bajos que en la **sección 1**, por lo que el uso de ribaltas no sería necesario.
 - **Subsección 3:** el rango de los valores del cortante del flujo oscila entre 0 y 6 N/m^2 . Como solución, se ha propuesto la plantación de estacones o plantas leñosas enraizadas de especies pertenecientes a la misma zona de la obra y que aguanten sumergidas un periodo de tiempo.
- **Especies vegetales recomendadas según a región ecológica:** el río Cañamares pertenece a la región ecológica “Sierra hercínica” por lo que las especies recomendadas son *Salix atrocinerea*, *Salix salviifolia*, *Fraxinus angustifolia*, *Alnus glutinosa* y *Prunus lusitanica*.



En la **figura 116**, se muestra a modo de diseño esquemático como resultaría la obra de bioingeniería en su conjunto. La **subsección 1 o zona 1**, se localiza en la margen izquierda y se representa con una coloración verde; la **subsección 2 o zona 2**, se localiza en el lecho del cauce y se representa con una coloración marrón; la **subsección 3 o zona 3**, se localiza en la margen derecha del lecho y se representa con una coloración verde manzana.

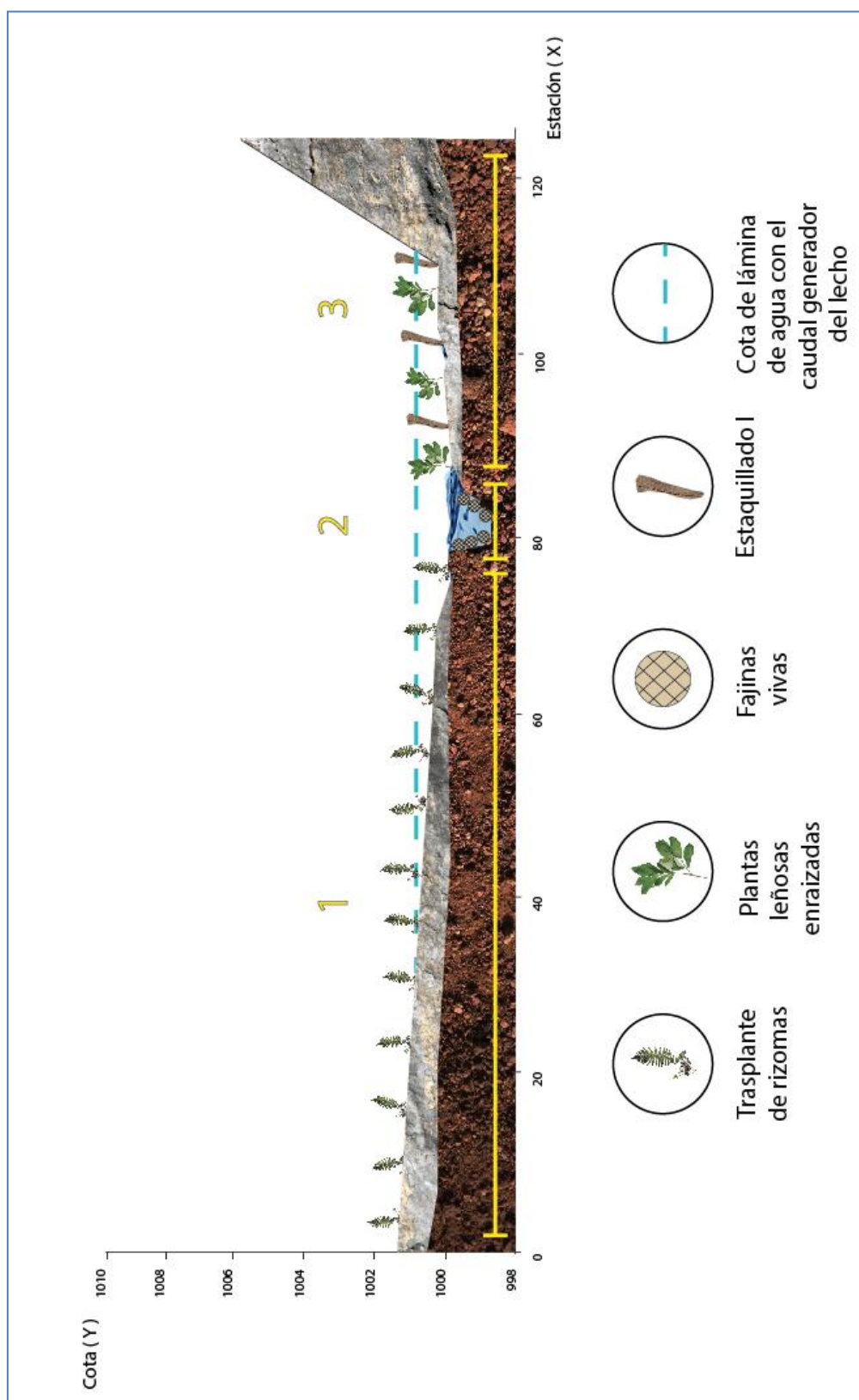


Figura 116: Diseño esquemático con vista transversal para la implantación de técnicas de bioingeniería en la sección 4 del tramo de estudio perteneciente al río Cañamares. Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

El uso de técnicas de bioingeniería en actuaciones de restauración fluvial posee multitud de beneficios para los ecosistemas fluviales además de asegurar la estabilidad estructural del cauce y márgenes, puesto que mejoran la dinámica natural de los ríos, combaten los procesos erosivos, aumentan la biodiversidad y mejoran estéticamente el paisaje. Asimismo, las técnicas de bioingeniería son más económicas que las técnicas de restauración fluvial convencionales y son auto adaptativas, ya que se van adaptando y desarrollando con el tiempo al medio natural.

Actualmente, no existe ninguna aplicación o herramienta que permita conocer la técnica de bioingeniería que más se ajuste a las características propias de cada tramo fluvial. Generalmente, las técnicas se seleccionan según el conocimiento que se tenga de ellas, lo que puede provocar que, por falta de información de nuevas técnicas o por falta de comparación entre ellas, se realice una errónea obra de restauración fluvial.

Por todo ello, se procedió a realizar la investigación propia del presente proyecto para determinar, conocidos un conjunto de parámetros hidráulicos y geométricos de un determinado tramo perteneciente a un río, cuáles de estas técnicas de bioingeniería son más adecuadas y/o eficaces para la estabilización del conjunto del lecho y los taludes de dicho tramo.

Una vez realizadas todas las fases en las que consiste este proyecto de investigación, se ha procedido a realizar una serie de conclusiones y limitaciones que han ido apareciendo a medida que avanzaba la investigación bibliográfica, la creación de la aplicación informática y su adecuación para los ejemplos reales de los tramos fluviales estudiados. Posteriormente, se van a separar las conclusiones según las diversas fases que constituyen el proyecto para poder explicar de una manera más clara y ordenada los resultados y las limitaciones que han surgido.

Fase 1.1: Investigación bibliográfica

La falta de información y estudios referentes a los temas de exposición del presente proyecto ha sido el factor más limitante a la hora de la realización de todo el proceso correspondiente al proyecto de investigación.

A pesar de todo el tiempo que conllevó la revisión bibliográfica (manuales de restauración fluvial, artículos científicos, fichas técnicas de productos o bibliografía

facilitada por expertos, etc.), aun queda pendiente una mayor investigación sobre las características y limitaciones técnicas que presenta cada técnica de bioingeniería.

Para que la elección de la técnica de bioingeniería empleada sea la más adecuada, hay que tener en cuenta sus aspectos biológicos y físico-mecánicos. En cuanto a los aspectos biológicos, sí que existe información sobre las especies a utilizar, el tipo de planta, la época de implantación o el mantenimiento de las distintas técnicas. Por el contrario, los aspectos físico-mecánicos, que corresponden a los esfuerzos a los que resiste una técnica de bioingeniería cuando está sometida a la circulación del flujo, son difícilmente reflejados en documentos científicos o en empresas que se dedican a la venta de materiales de bioingeniería. Por lo tanto, apenas se tiene constancia de las limitaciones que presenta cada técnica de bioingeniería en cuanto a las acciones máximas del flujo que soportan.

Asimismo, se destaca que las limitaciones hidráulicas y geométricas de cada técnica de bioingeniería no se encuentran profundamente detalladas o validadas, por lo que se dan valores generales sin una comprobación real en el campo.

1.2: Adaptación de las metodologías de cálculo de canales a artificiales a cauces naturales

Las metodologías de cálculo para la estimación de parámetros como el cortante del flujo no aparecen desarrolladas para cauces naturales sino que han sido estudiadas para canales artificiales normalmente trapezoidales. Por consiguiente, se han escogido aquellas fuentes de información donde las metodologías de estimación de los parámetros necesarios para conocer las características limitantes de las técnicas de bioingeniería tengan éxito y se adapten a cauces naturales.

Una vez recogida la información necesaria, se ha procedido a realizar estudios entre las diversas metodologías y adecuarlas de tal manera que se ajusten a cualquier tipo de sección transversal de un cauce natural.

- **Estimación de la velocidad media del flujo y su distribución a lo largo de una sección transversal:** para la adaptación de éste parámetro a cauces naturales no ha existido ningún tipo de problema ya que el programa informático HEC-RAS ya aporta los cálculos y valores necesarios una vez modelizado el tramo fluvial de estudio.

- **Estimación de la pendiente media del talud:** para adaptar la estimación de la pendiente media de los taludes de un cauce natural basta con conocer los puntos de las estaciones (x) y de las cotas (y) de una sección transversal de un río que aporta la herramienta informática HEC-RAS, y obtener la pendiente de cada subsección o la pendiente media de los taludes a través de la **ecuación nº 5**.
- **Estimación del cortante medio del flujo y sus máximos en el lecho y en el talud:** posteriormente al estudio de la metodología de cálculo del cortante de flujo, se ha llegado a la conclusión de que el **método nº 5**, sacado del libro *“Design of Roadside Channels with Flexible Linings”* y publicado por los autores T. Kilgore, R., & K. Cotton, G. en el año 2005, ha resultado ser el más apropiado para la adaptación en cauces naturales. Como se ha visto anteriormente en el presente proyecto, se ha escogido dicho método debido a que cumplió prácticamente todas las consideraciones iniciales, presentaba un menor número de limitaciones y no se tuvo problema a la hora de su sistematización en la aplicación informática. Asimismo, este método proporciona valores de los cortantes de flujo más altos y, por lo tanto, se posiciona del lado de la seguridad y reduce los posibles errores a la hora de implantar una técnica de bioingeniería.
- **Estimación de la distribución de cortantes de flujo a lo largo de una sección transversal:** La generalización de la distribución de los cortantes en cauces naturales no ha sido estudiada o no ha sido encontrada en la anterior revisión bibliográfica de fuentes de información. No se puede afirmar que para una sección transversal de un cauce natural exista únicamente un cortante de flujo determinado si no que, en cada punto de dicha sección, existe un valor distinto del esfuerzo cortante. Por lo tanto, se ha llegado a sistematizar los cálculos para conocer la distribución de los cortantes del flujo a lo largo de una sección transversal determinada. Para resolver el problema, se ha utilizado la **ecuación nº 6**, en la que se tiene en cuenta el punto donde el cortante del flujo es máximo en el lecho y la profundidad o calado en la que se encuentra cada punto de una sección transversal.
- **Estimación del cortante del flujo en una curva:** una vez realizado el estudio de la metodología de cálculo del cortante del flujo en una curva, se ha llegado a la conclusión de que el **método nº 5** ha resultado ser el más apropiado para la adaptación en cauces naturales debido a que es el único que, además del coeficiente de mayoración por curvatura, calcula la longitud de protección

aguas abajo de la curva y la sobre-elevación adicional de la superficie mojada. Además, su sistematización en la aplicación informática ha concurrido de una forma sencilla y no ha generado ningún tipo de problema a la hora de calcular dichos valores para cualquier tipo de sección transversal.

Fase 2: Creación de la base de datos

No existía una base de datos que, atendiendo a las características y limitaciones técnicas, reuniese conjuntamente a las técnicas de bioingeniería existentes. Sin embargo, el presente proyecto ha conseguido reunir la mayoría de estas técnicas a través de una base de datos creada en Microsoft Excel y que servirá para realizar la posterior consulta, en la aplicación informática, para la selección final de técnicas de bioingeniería según las características de un tramo fluvial.

Como se ha visto anteriormente, la realización de la base de datos debe contener una relación detallada y actualizada de las características principales de las técnicas de bioingeniería existentes con sus respectivas limitaciones hidráulicas y geométricas. Se recogen, para cada técnica, rangos de valores de los cortantes de flujo, velocidades del flujo y pendientes del talud que permitan su establecimiento. Además, se indica el campo de implantación, la época en la que realizar la obra y las especies vegetales recomendadas.

Una vez creada la base de datos, se aprecia que en muchas ocasiones los valores limitantes de los parámetros hidráulicos y geométricos de las técnicas de bioingeniería no están del todo validados y, a veces, sólo se conocen las limitaciones de uno de estos parámetros.

Para concluir, no se ha podido ampliar la base de datos debido a la falta de información de las limitaciones que presentan las técnicas debido a otros factores como pueden ser las heladas, el oleaje, los niveles de humedad, la estratificación, la densidad de la cubierta vegetal o los costes de ejecución. Por consiguiente, se deja como línea de futuro para posibles proyectos que quieran profundizar y mejorar la base de datos creada en el presente proyecto.

Fase 3: Sistematización de cálculos

Como se ha visto en el presente proyecto, se pretende conseguir una sistematización de los cálculos empleados para conocer los valores limitantes de los parámetros anteriormente expuestos. Esta aplicación está pensada para que, sea cual sea el tramo

de estudio, se den los resultados más fiables posibles acerca de las características del flujo en el lecho y talud de un determinado río.

A pesar de todo, no se ha podido sistematizar todos los procesos de cálculo debido a la gran diversidad de geometrías que presentan las secciones transversales de los ríos. Por lo tanto, existen una serie de pasos que se han visto anteriormente en el proyecto en los que el usuario deberá completar manualmente.

La sistematización de la metodología de cálculo para la velocidad del flujo, la pendiente de los taludes y los cortantes de flujo ya se encuentra resuelta. Sin embargo, para la elección de una técnica de bioingeniería habría que tener en cuenta numerosos factores ambientales que intervienen en el río y sus riberas si se pretende que la obra de ingeniería tenga un mayor éxito.

Fase 4: Programación

Debido a que no se tiene una suficiente experiencia en programación y por la imposibilidad de la sistematización total de la aplicación informática, no se ha podido realizar ventanas emergentes donde el usuario introduzca las variables de entrada ni que la aplicación de como respuesta otra ventana emergente donde refleje las técnicas de bioingeniería más eficaces según las características del tramo fluvial de estudio.

Por lo tanto, la programación de la aplicación informática ha consistido en una consulta en la que el usuario introduce ya los resultados que ha obtenido de su tramo fluvial y se da como respuesta las técnicas de bioingeniería y sus características técnicas en otra hoja de Microsoft Excel.

Fase 5: Aplicación práctica con ejemplos reales

Una vez realizadas las pruebas de la aplicación informática con dos ejemplos reales (un tramo del río Urumea y otro del río Cañamares), se ha podido observar que el uso de dicha aplicación resulta realmente útil. Aunque ambos tramos obtuvieron valores bajos en lo referente a los parámetros de consulta, se pudo comprobar que gracias a la base de datos y a la aplicación informática se pueden excluir ciertas técnicas y escoger, entre las que son adecuadas, la que el usuario prefiera según su propio criterio.

Por lo tanto, es probable que en algunas ocasiones se ajusten varias opciones. En estas ocasiones, será el usuario el que deberá tomar la decisión de la técnica de bioingeniería que le convence más, ya sea por motivos estéticos, económicos, ecológicos, etc.



Como se ha mencionado antes, existen diversos factores ajenos a la aplicación que el usuario deberá tener en cuenta a la hora de seleccionar una técnica de bioingeniería.

Conclusión final

Aun con las limitaciones que se han encontrado a la hora de realizar este proyecto de investigación, se puede decir que se ha avanzado un paso en lo referente a la selección de técnicas de bioingeniería según las características del terreno y el comportamiento de los cursos fluviales.

Se espera poder ir perfeccionando la herramienta a lo largo del tiempo en varios aspectos: actualización y ampliación de la base de datos, mejora de los cálculos de sistematización, ampliación de los factores ambientales a tener en cuenta y mejora de la herramienta en cuanto a la programación y visualmente hablando.





8. Bibliografía

Alcázar Montero, J., 2007. *El Método del Caudal Básico para la determinación de Caudales de Mantenimiento Aplicación a la Cuenca del Ebro*. Universidad de Lleida. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Lleida.

Altarejos García, L., 2010. *Estudio hidrodinámico del río Linares. Proyecto de I+D+I para la optimización de técnicas de bioingeniería*. TRAGSA. CPS Ingenieros.

Anderson, A. G., 1973. *Tentative Design Procedure for Riprap-Lined Channels- Field Evaluation*. Minneapolis: University of Minnesota.

Bentrup, G., & Hoag, J. C., 1998. *The Practical Streambank Bioengineering Guide*. USDA NRCS Aberdeen Plant Materials Center.

Crocetti, C., Ferrari, R., Petrone, A., & Preti, F., 2012. *Estimación de Vulnerabilidades y Reducción del Riesgo de Desastres a Nivel Municipal en el Ecuador*. Quito.

De la Mota, A. *Caudales en ríos. Instrumentos de medida y redes*. (CEDEX). EOI Escuela de Negocios.

Eubanks, C. E., & Meadows, D., 2002. *A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization*. United States Department of Agriculture.

Faber, R., 2004. *New techniques for urban river rehabilitation. Specifications for new materials and techniques Improve instream morphology Soil-bioengineering*. Vienna: Urban River Basin Enhancement Methods.

Ferández Yuste, J. A., & Martínez Santa-María, C., 2013. *Prevención y Corrección de Impactos en Ecosistemas Acuáticos. Restauración Hidromorfológica de Ríos II*. Universidad Politécnica de Madrid.

Fernández Yuste, J. A., & Martínez Santa-María, C., 2012. *Hidráulica Fluvial. Principios básicos del movimiento de un fluido en lámina libre. Modelización 1D*. Universidad Politécnica de Madrid. .

FHWA., 1998. *Design of riprap revetment*.

Garanaik, A., & Sholtes, J., 2013. *River Bank Protection*.

Goard, D., 2006. *Riparian Forest Best Management Practices: Tree Revetments*. Kansas Forest Service.



Godé, L.X., García, E., & Gutiérrez, C., 2008. *La gestió i recuperació de la vegetació de ribera. Guia tècnica per a actuacions en riberes*. Barcino Solucions Gràfi ques SL.

González Ortega, J. M., & Martínez Marín, E., 2004. *Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta*. Escuela Técnica Superior de ingenieros de caminos, canales y puertos .

González del Tánago, M., & García de Jalón, D., 2007. *Restauración de Rios. Guía Metodológica para la elaboración de proyectos*. Centro de publicaciones. Ministerio de Medio Ambiente.

González Sánchez, M., Sánchez Martínez, F. J., Aparicio Martín, M., & Saiz de la Hoya Zamacola, A., 2011. *Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos*. Dirección Técnica de TRAGSA.

Greening, G. R., 2010. *A Guide to Bank Restoration Options for Large River Systems: Part II Bioengineering Installation Manual*. Minneapolis: The Mississippi Watershed Management Organization.

Herrera Grao, T., 2005. *Viabilidad de técnicas y materiales de bioingeniería para la naturalización de tramos intervenidos con influencia de mareas y oleajes*.

Hollis H. Allen, J. R., 1997. *Bioengineering for Streambank Erosion Control*. U.S. Army Corps of Engineers.

Javid, S., & Mohammadi, M., 2012. *Boundary shear Stress in a trapezoidal Channel*. International Journal of Engineering.

Johnson, A.W., & Stypula, J.M. , 1993. *Guidelines for Bank Stabilizatón Projects in the Riverine Environments of King County*. King County Department of Public Works, Surface Water Management Division, Seattle, Wash.

Londono, Y. *Cap 4.3 Control Erosión Lineal*.

MAGRAMA., 2013. Boletín de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos. SAUCE .

Magdaleno Mas, F., 2011. *Manual de técnicas de restauración fluvial*. CEDEX: Sección de Edición.

Colegi Oficial d'enginyers tecnicos agricols i perits agricols de Catalunya, 1998. *Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Obras de Bioingeniería: Técnicas de Estabilización de taludes*. Barcelona.



Palmeri, F., & Menegazzi, G., 2013. *Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica*.

Palmeri, F., Silván, F., & Prieto Caló, I., 2002. *Manual de Técnicas de Ingeniería Naturalística en Ámbito fluvial*. Dirección de Aguas del Gobierno Vasco.

Pallerola Comamala, J., 2011. *Las Macros en Microsoft Excel 2010. 2ª Edición*. Madrid: RA-MA.

Paulo Fernandes, J., & Medes de Freitas, A. R., 2011. *Introdução à engenharia natural. Volume II*. EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.

Pérez Campomanes, G., 2013. *Dinámica de Gases*. Universidad Nacional del Santa: Departamento de Energía y Física.

Projar. *Catálogo de Ingeniería Ambiental y Bioingeniería*.

Rodríguez Ruiz, P., 2008. *Hidráulica II. Hidráulica de canales*.

S.D.G. Campbell, R. S., 2008. *Guidelines for soil bioengineering applications on natural terrain landslide scars*. Hong Kong.

S.Elliot, T., 2012. *River bank erosion rates and the case for willow spiling as a bank stabilisation solution*. School of Environmental Sciences University of East Anglia, UK.

Sánchez Martínez, F. J., 2011. *Protocolo de seguimiento de las actuaciones de bioingeniería: resultados, costes y conclusiones*.

Sánchez Martínez, F.J., García Días, J., & Aparicio Martín, M., 2012. *Experiencias obtenidas en el estudio de la aplicación de distintas técnicas de bioingeniería en varias actuaciones en el marco de la estrategia nacional de restauración de ríos*.

Sangalli, P., 2010. *Curso de restauración ambiental en áreas degradadas*. Burgos: Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP).

S.R. Abt, R.J. Wittler, J.F. Ruff, D.L. LaGrone, M.S. Khattak, J.D. Nelson, N.E. Hinkle, & D.W. Lee., 1988. *Development of Riprap Design Criteria by Riprap Testing in Flumes: Phase II*. Washington.

Suarez Díaz, J., 2001. *Control de la Erosión en Zonas Tropicales: Materiales para el control de la erosión*.

T. Kilgore, R., & K. Cotton, G., 2005. *Design of Roadside Channels with Flexible Linings. Hydraulic Engineering Circular Number 15, Third Edition*.



Tragsa., 2012. *Proyecto de I+D+i. Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos*. Madrid.

USDA., 2007. *Stream Restoration Design National Engineering*. United States Department of Agriculture.

Viejo Fraile, E., Lletjós Castells, R.L., Montardit Ardiaca, V., Guilera Soler, J., & Pericall Lecha, M., 2010. *Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Obras de bioingeniería: Técnicas de recubrimiento y de estabilización aplicables en ámbitos fluviales*. Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana.

Hernanz Sánchez, M., González Sánchez, M. García-Guijas Redondo, J. M., Saiz de la Hoya Zamacola, A., Sánchez Martínez, F. J., & Aparicio Martín, M., 2013. *Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos de ámbito mediterráneo*. Dirección Técnica de Tragsa.

W. Mays, L., 1999. *Hydraulic Design Handbook*. McGraw-Hill.

W. Brunner, G., 2010. *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 4.1*.

Zeh, H., 2007. *Ingeniería Biológica. Manual Técnico*.



Páginas web consultadas:

Aquanea S.L. Bioingeniería Aplicada al Paisaje, 2014 [consulta 15-10-2014]. Disponible en: <http://www.aquanea.com/>.

Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP), 2014 [consulta 13-12-2014]. Disponible en: <http://www.aeip.org.es/>.

Bonterra Ibérica S.L., 2014 [consulta 07-10-2014] . Disponible en: <http://www.controlerosion.es>.

Brucjardí, 2015 [consulta 06-06-2015]. Disponible en: <http://www.brucjardi.com/>.

CEDEX. Anuario de aforos, 2015 [consulta 25-06-2015]. Disponible en: <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=1105>.

CIREF. *Centro Ibérico de Restauración Fluvial*, 2014 [consulta 16-12-2014]. Disponible en: <http://www.cirefluvial.com/>.

Comunidad ISM, 2015 [consulta 02-04-2015]. Disponible en: <http://www.comunidadism.es/blogs/como-evaluar-una-avenida-con-hec-ras-en-5-pasos>.

Confederación Hidrográfica del cantábrico , 2015 [consulta 19-07-2015]. Disponible en: <http://www.chcantabrico.es/index.php/es/elorganismo/ambitoterritorial/marcofisico/recursoshidricos/rios/rios-or/473-río-urumea>.

Construmática, 2015 [consulta 21-06-2015]. Disponible en: <http://www.construmatica.com/>.

Convertir Unidades, 2015 [consulta 02-02-2015]. Disponible en: <http://www.convertir-unidades.info>.

Durotex geotextiles, 2015 [consulta 07-07-2015]. Disponible en: <http://www.geotextiles.es/es/content/6-que-es-geotextiles>

ENDMEMO, 2015 [consulta 12-01-2015]. Disponible en: <http://www.endmemo.com/>.

European Federation for Soil Bioengineering, 2015 [17-01-2015]. Disponible en: <http://efib.org/>.

Fundación CRANA. Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra, 2015 [consulta 18-05-2015]. Disponible en: <http://www.crana.org/es/agua-rios/documentacion/documetancian-sobre-restauracion-raos>.



Fundación Nueva Cultura del Agua, 2014 [consulta 20-12-2014]. Disponible en: <http://www.fnca.eu>.

Horticom News, 2015 [consulta 03-03-2015]. Disponible en: <http://www.horticom.com>.

Ingeniería civil, 2015 [consulta 08-06-2015]. Disponible en: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/02/elementos-geometricos-de-la-seccion.html>

MAGRAMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015 [consulta 07-01-2015]. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es>.

Naturalea, 2014 [consulta 20-10-2014] . Disponible en: <http://www.naturalea.eu/>.

SER, 2015 [consulta 15-07-2015] . Disponible en: <http://www.ser.org/>.

TIROGAVERD, 2015 [consulta 25-07-2015] . Disponible en: <http://www.tirogaverd.com/es/>.

Ur agentzia. Agencia vasca del agua, 2015 [consulta 02-07-2015] . Disponible en: <http://www.uragentzia.euskadi.eus/informacion/proceso-de-concertacion-para-la-implantacion-del-regimen-de-caudales-ecologicos-en-las-cuencas-internas-del-pais-vasco/u81-000335/es/>





Anexo I: Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería

Anexo I

Fichas resumen de las técnicas de bioingeniería

Técnicas de ingeniería naturalística

1. Plantación de especies leñosas, arbóreas y arbustivas.

Técnica Plantación de especies leñosas, arbóreas y arbustivas

Características Técnicas

Plantación de leñosas, arbóreas y arbustivas, generalmente en la zona por encima del nivel de crecida normal, por encima de la línea de plantas flexibles como las salicáceas, y por encima de zonas más frecuentemente inundadas, donde otras técnicas incorporan las plantas palustres y otras. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

20 – 40
(Palmeri, Silván, & Prieto, 2002).

Época de Implantación

En el periodo de reposo vegetativo.

Ámbito de aplicación

En todos aquellos casos en que se quiera restablecer la vegetación del espacio fluvial, para que en un corto plazo y una vez establecidas las plantas, alcancen su auto mantenimiento. (Magdaleno, 2011).



2. Plantas leñosas enraizadas.

Técnica Plantas leñosas enraizadas

Características Técnicas

Planta enraizada de especies arbustivas o arbóreas que se usan en las riberas de los ríos o sobre pendientes inestables. (Palmeri, Silván, & Prieto, 2002).

Velocidades del flujo (m/s)

1
(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100
(Paulo & Medes, 2011).

Pendiente (°)

Depende de la especie.

Época de Implantación

En el periodo de reposo vegetativo.

Ámbito de aplicación

Se pueden usar en las riberas de los cursos de agua o sobre las pendientes inestables.



3. Estaquillado.

Técnica Estaquillado

Características Técnicas

Plantación directa de estacas. La selección de especies es fundamental. Salvo que se tenga garantía plena del origen de la estacilla, es recomendable, confeccionarlas directamente de zonas cercanas, en el momento de la obra, y no recurrir a estaquillas de viveros comerciales. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

<3 - 3,5

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010) & (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 -150

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

26,56 (Greening, 2010).

Época de Implantación

Enero – Febrero (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Ámbito de aplicación

Instalar la orla de salicáceas en zonas donde de manera natural no se restituya o donde se desee adelantar la colonización. (Magdaleno, 2011).



4. Plantación de estocones de sauce

Técnica Plantación de estocones de Sauce

Características Técnicas

Instalar estacas de cierto tamaño en el terreno natural o bien en los huecos de los cantos de escollera para adelantar la colonización de los *Salix*.

Velocidades del flujo (m/s)

3 - 3,5

(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 -150

(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Pendiente (°)

20 – 40

(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Época de Implantación

Enero – Febrero (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Ámbito de aplicación

En taludes de pendiente limitada, márgenes de ríos y lagos, intersticios y grietas de escollera, muros, gaviones, como piquetas vivas. (Magdaleno, 2011).



5. Cobertura de ramas.

Técnica

Cobertura de ramas

Características Técnicas

Se trata de un recubrimiento en la margen del río mediante la plantación de varas que protegen, desde el principio, de la erosión causada por el flujo de agua. Para una mejor protección del pie del talud se puede realizar una "Cobertura armada". (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

0 – 3

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

200 -300 (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010) & (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Pendiente (°)

30 – 35

(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

Eficaz para la superficie de riberas amenazadas por la corriente de agua y por el movimiento de las olas. No es conveniente utilizarla en ríos con elevado transporte sólido. (Magdaleno, 2011).



 naturalea

6. Trasplante de rizomas.

Técnica

Trasplante de rizomas

Características Técnicas

Recolección de rizomas de varios centímetros de las plantas silvestres que son cubiertos con un ligero estrato de terreno para evitar su desecación. Su efecto es una cobertura rápida de terreno más eficaz que la obtenida con la siembra. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

0 – 3

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 -200

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

Depende de la especie.

Época de Implantación

Al inicio o al final del período de parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

En zonas de alta montaña donde el periodo vegetativo es más breve, márgenes fluviales, áreas de escasa vegetación cuyas semillas no se encuentren en el comercio. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).



 GUIADEJARDINERIA

7. Estera de ramas.

Técnica Estera de ramas

Características Técnicas

Técnica que recubre las márgenes del río con estacas y varas de vegetación de ribera capaz de reproducirse vegetativamente. (AEIP, 2014).

Velocidades del flujo (m/s)

1 – 3
(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 - >200
(Paulo & Medes, 2011).

Pendiente (°)

40
(Horticom News, 2015).

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

Eficaz en las riberas para evitar la erosión de los márgenes. Constituye una protección continua y elástica de la orilla y mejora el balance hídrico y térmico, favoreciendo el desarrollo de la vegetación en el terreno y en estrato arbóreo. (AEIP, 2014).



El Giralillo de Sevilla
BLOG DE LA ASOCIACIÓN SEVILLA-VERDE

8. Estaquillado y cobertura de ramas (inicial).

Técnica Estaquillado y cobertura de ramas (inicial)

Características Técnicas

Usa una combinación entre estaquillado y cobertura de ramas.

Velocidades del flujo (m/s)

3,66
(Greening, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

196,3
(Greening, 2010).

Pendiente (°)

26,56
(Greening, 2010).

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa (Enero- Febrero).

Ámbito de aplicación

Eficaz para la superficie de riberas amenazadas por la corriente de agua y por el movimiento de las olas. No es conveniente utilizarla en ríos con elevado transporte sólido. (Magdaleno, 2011).



naturalea

9. Estaquillado y cobertura de ramas (crecido).

Técnica

Estaquillado y cobertura de ramas (crecido)

Características Técnicas

Usa una combinación entre estaquillado y cobertura de ramas.

Velocidades del flujo (m/s)

3,66
(Greening, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

392,6
(Greening, 2010).

Pendiente (°)

26,56
(Greening, 2010).

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa (Enero- Febrero).

Ámbito de aplicación

Eficaz para la superficie de riberas amenazadas por la corriente de agua y por el movimiento de las olas. No es conveniente utilizarla en ríos con elevado transporte sólido. (Magdaleno, 2011).



El Giralillo de Sevilla
BLOG DE LA ASOCIACIÓN SEVILLA «VERDE»

10. Revestimiento de árboles.

Técnica

Revestimiento de árboles

Características Técnicas

Revesitimiento de árboles enteros cableados juntos y sujetos en un lugar con rocas y anclajes enterrados en las orillas. (Johnson & Stypula, 1993).

Velocidades del flujo (m/s)

186,7
(Greening, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

26,56
(Greening, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Cualquier momento. Mejor en el periodo de parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

Se utilizan cuando se necesita protección contra la socavación en orillas. El diámetro del tronco varía según el tipo de corriente del flujo. (Johnson & Stypula, 1993).



Chestatee-ChatTaboochee RC&D Council, Inc.

11. Tocones enraizados.

Técnica Tocones enraizados

Características Técnicas

Tocones que proporcionan una protección y un apoyo estructural de orillas. Se recogerán los escombros y sedimentos para formar dichas orillas. Buen hábitat para peces.

Velocidades del flujo (m/s)

1 – 3

(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 -150 (Paulo & Medes ,2011) & (Greening, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Se deben utilizar con otras técnicas de bioingeniería para estabilizar una orilla. En orillas de lagos para combatir el viento y las olas la erosión. Se utiliza para la estabilización de orillas y para crear refugios para peces. (Eubanks & Meadows, 2002).



12. Hilera de tocones.

Técnica Hilera de tocones

Características Técnicas

Hilera de tocones que proporcionan una protección y un apoyo estructural de orillas. Se recogerán los escombros y sedimentos para formar dichas orillas. Buen hábitat para peces.

Velocidades del flujo (m/s)

1,5 – 2

(Faber, 2004).

Cortantes de flujo (N/m²)

50 -80

(Faber, 2004).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Se deben utilizar con otras técnicas de bioingeniería para estabilizar una orilla. En orillas de lagos para combatir el viento y las olas la erosión. Se utiliza para la estabilización de orillas y para crear refugios para peces. (Eubanks & Meadows, 2002).



13. Trenzado.

Técnica Trenzado

Características Técnicas

Trenzado de ramas de arbusto y árboles de ribera con capacidad de rebrote fijadas al terreo mediante estacas de madera o acero, y posteriormente rellenas de tierra. (Naturalea, 2014).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6
(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 – 200
(Paulo & Medes, 2011).

Pendiente (°)

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

Se instala sobre las riberas con el fin de sujetar los estratos superficiales del terreno en caso de erosión superficial o desaparición del manto vegetal. No es conveniente con elevada pendiente.



14. Fajinas vivas.

Técnica Fajinas vivas

Características Técnicas

Técnica que coloca haces de arbustos y árboles de ribera con capacidad de reproducción vegetativa. Se clavan estacas de madera para su sujeción. (Naturalea, 2014).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 3,5
(Faber, R. 2004).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 – 150
(Faber, R. 2004).

Pendiente (°)

60
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Durante el periodo vegetativo, la fajina debe encontrarse parcialmente fuera del agua.


Ámbito de aplicación

En cursos de agua con caudales de nivel medio relativamente constantes y con una velocidad inferior a 3 m/s, generalmente combinadas con otras técnicas de defensa. La oscilación del nivel medio del agua no debe ser superior al metro. También en láminas de agua con oscilación limitada. (Magdaleno, 2011).



15. Fila de fajinas.


Técnica	Fila de fajinas
Características Técnicas	<p>Técnica que consiste en colocar haces de arbustos y árboles de ribera con capacidad de reproducción vegetativa, dispuestas en fila a través del pie de las riberas de ríos, lagos y lagunas. (Naturalea, 2014).</p>
Velocidades del flujo (m/s)	3,3 – 3,8 (Faber, R. 2004).
Cortantes de flujo (N/m ²)	150 – 200 (Faber, R. 2004).
Pendiente (°)	
Época de Implantación	Durante el período vegetativo, la fajina debe encontrarse parcialmente fuera del agua.
Ámbito de aplicación	



naturalea

16. Muro de fajinas.

Técnica	Muro de fajinas
Características Técnicas	<p>Muro de haces de arbustos y árboles de ribera con capacidad de reproducción vegetativa. (Naturalea, 2014).</p>
Velocidades del flujo (m/s)	1 – 4 (Paulo & Medes, 2011) & (Faber, R. 2004).
Cortantes de flujo (N/m ²)	100 – 240 (Paulo & Medes, 2011) & (Faber, R. 2004).
Pendiente (°)	
Época de Implantación	Durante el período vegetativo, la fajina debe encontrarse parcialmente fuera del agua.
Ámbito de aplicación	



Erosion Solutions

17. Ribalta.

Técnica Ribalta

Características Técnicas

Se trata de estratos alternativos de fajas vivas, dispuestas longitudinalmente al margen, y ramas vivas de sauce, dispuestas transversalmente al margen sobre el nivel medio del agua. Se puede repetir la estructura alcanzando la altura deseada. La estructura se rellena con material inerte. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3,5
(Magdaleno, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

20 – 100
(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Pendiente (°)

60
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Parada vegetativa

Ámbito de aplicación

Se utiliza en la recuperación de márgenes erosionados en cursos de agua con caudales y nivel medio relativamente constantes aunque la profundidad del agua sea elevada. Ofrece mayor resistencia que las fajas simples de ribera. (Magdaleno, 2011).



naturalea

18. Enrejado vivo.

Técnica Enrejado vivo

Características Técnicas

Obra utilizada en la estabilización de taludes o riberas con elevadas pendientes de terreno compacto, y para la estabilización de taludes con fenómenos de erosión superficial de elevada inclinación. Se realiza con troncos dispuestos perpendicularmente entre si y mediante la colocación de estacas vivas o plantas enraizadas. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

45 – 50
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

Superficies reducidas donde sólo son posible reperfilados o sobre taludes muy escarpados de carreteras o líneas ferroviarias. (Magdaleno, 2011).



naturalea

19. Entramado vivo.

Técnica Entramado vivo

Características Técnicas

Estructura de madera constituida por un entramado de troncos que forma una cámara frontal en la que se insertan las fajinas. Frontalmente se coloca un palo vertical sobre el que se clavan los troncos horizontales y transversales. La obra se completa con el relleno de tierra y piedra. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

45 – 55
(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Época de Implantación

Parada vegetativa.

Ámbito de aplicación

Taludes inestables o riberas fluviales sujetas a erosión. Puede utilizarse en cursos de agua con elevada energía y transporte sólido. (Aquanea, 2014).



aquanea

20. Muro de madera "Cribwall".

Técnica Muro de madera "Cribwall"

Características Técnicas

Muro de gravedad formado por una estructura celular de troncos de madera distribuidos en dos paredes, combinado con inserción de plantas vivas. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

1 – 3
(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 – 200
(Paulo & Medes, 2011).

Pendiente (°)

45
(Paulo & Medes, 2011).

Época de Implantación

Periodo de parada vegetativa.
Durante condiciones de bajo caudal.

Ámbito de aplicación

Eficaces para la reparación de la erosión en las márgenes y en áreas donde las corrientes son fuertes y rápidas. Útil para grandes áreas de socavación. (Johnson & Stypula, 1993).



MACCAFERRI

21. Deflector vivo estructurado con Krainer.

Técnica Deflector vivo estructurado con krainer

Características Técnicas

Obra transversal respecto a la dirección del río, situada en uno o en ambos márgenes. Su objetivo es la reducción de la velocidad del agua y la mezcla con reducción de la velocidad de flujo que permite la deposición de material sólido. También constituyen puntos de refugio para la fauna. Se utilizan troncos, ramas, piedra, estacas... (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 – 200
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Periodo de parada vegetativa.

Ámbito de aplicación



Consolidación de los márgenes del lecho ordinario de los cursos fluviales con una estructura biodegradable. Desvíos del canal de aguas bajas. Aumento de la diversidad morfológica del cauce. Consolidación de la vegetación propia de ribera. Protección de la base de taludes fluviales con procesos de erosión local. Potenciación de procesos de meandrización del río y en el régimen de transporte de sedimentos. Constituyen un buen refugio para la fauna piscícola. (Magdaleno, 2011).

22. Deflector.

Técnica Deflector

Características Técnicas

Obra transversal respecto a la dirección del río, situada en uno o en ambos márgenes. Su objetivo es la reducción de la velocidad del agua y la mezcla con reducción de la velocidad de flujo que permite la deposición de material sólido. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

1
(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100
(Paulo & Medes, 2011).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Periodo de parada vegetativa. Durante condiciones de bajo caudal.

Ámbito de aplicación

Se aplica en cursos de agua con anchura mínima de unos 10 m, donde es necesario alejar la corriente de la ribera y detener la erosión. Constituye un buen refugio para la fauna piscícola. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).



Ciudadanos Independientes de Cistierna

Técnicas de ingeniería biofísica

23. Manta orgánica.

Técnica Manta orgánica

Características Técnicas

Entramado de fibras de material orgánico como la paja, esparto o coco estructuradas en mallas degradables orgánicas o de polipropileno. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

45
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Se utiliza para revegetar márgenes con una pendiente superable superior a 4:1 (H:V). (Magdaleno, 2011).



24. Red orgánica.

Técnica Red orgánica

Características Técnicas

Técnica basada en la consolidación de la estructura del suelo por medio de una red de coco o yute, protegiéndolo de las avenidas, las lluvias torrenciales o de la escorrentía lateral. Esta estructura retiene la humedad y facilita el restablecimiento de la vegetación. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

45
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Se trata de un sustituto de la manta orgánica en zonas con mayor nivel de impacto: Consolidación de taludes con pendiente pronunciada, Protección del suelo ante la lluvia, Restauración de márgenes artificiales, Retención y estabilización de sedimentos. (Magdaleno, 2011).



25. Unidad de planta estructurado en fibra tipo Plant Plug™.

Técnica

Unidad de planta estructurado en fibra tipo Plant Plug™

Características Técnicas

Se trata de un sistema radicular de 20 x 20cm de una planta acuática estructurada en fibra de coco que se presenta en un contenedor de 1 litro. El objeto de esta técnica es proporcionar una planta acuática que presente un sistema de raíces y/o rizomas más y mejor desarrollados mediante la combinación de un sustrato inerte y de unas técnicas desarrolladas en los viveros de producción. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación



NYC DAILY

Restauración de zonas donde sea necesario asegurar la supervivencia de la planta bajo condiciones extremas de velocidad de corriente, caudal, etc. Plantación de herbáceas en escolleras y otras estructuras de protección con piedra. Favorecer la colonización natural. Retención y estabilización de sedimentos. (Magdaleno, 2011).

26. Herbazal estructurado en fibra tipo Plant Pallet™ o Plant Carpet™.

Técnica

Herbazal estructurado en fibra tipo Plant Pallet™ o Plant Carpet™

Características Técnicas

Se trata de fibra vegetal laminar estructurada en una red del material matriz, que posee una elevada biodegradabilidad, en donde se han desarrollado diferentes hidrófitos. Técnicamente consistiría en desarrollar especies propias de la zona de obra. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

4
(Magdaleno, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación



aquanea

Sistemas de depuración de aguas residuales. • Retención y estabilización de sedimentos. Protección de algunos puntos del curso fluvial, susceptibles a la erosión hídrica. • Naturalización de lagunas y balsas en parques urbanos, áreas de recreo y balsas de riego. Naturalización de escolleras y espigones. Plantación de especies helófitas herbáceas con una densidad, integración al medio y nivel de acabado de obra elevado. Estabilización de márgenes y taludes fluviales. Naturalización de márgenes de embalses. (Magdaleno, 2011).

27. Geomallas.

Técnica Geomallas

Características Técnicas

Consisten en unas matrices orgánicas o sintéticas estructuradas en mallas de polipropileno para la protección del suelo en taludes, márgenes fluviales u otras áreas que requieran una protección superficial del suelo antes de que éste presente una cobertura vegetal eficaz y permanente. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 - 150
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

45
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Protección de taludes. Creación de drenajes y canales temporales vegetados. Sustitución de muros, gaviones de escolleras para garantizar protección, reducir costes de obra y posibilitar la colonización vegetal. (Magdaleno, 2011).



aquanea

28. Geomalla degradable.

Técnica Geomalla degradable

Características Técnicas

Consisten en unas matrices orgánicas degradables para la protección del suelo en taludes, márgenes fluviales u otras áreas que requieran una protección superficial del suelo antes de que éste presente una cobertura vegetal eficaz y permanente. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

2,44 – 3,05
(Aquanea, 2014).

Cortantes de flujo (N/m²)

90 – 110
(Aquanea, 2014).

Pendiente (°)

26,56 – 63,43
(Aquanea, 2014).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Protección de taludes. Creación de drenajes y canales temporales vegetados. Sustitución de muros, gaviones de escolleras para garantizar protección, reducir costes de obra y posibilitar la colonización vegetal. (Magdaleno, 2011).



aquanea

29. Geomalla permanente (suelo desnudo).

Técnica Geomalla permanente (suelo desnudo)

Características Técnicas

Consisten en unas matrices orgánicas o sintéticas estructuradas en mallas de polipropileno para la protección del suelo en taludes, márgenes fluviales u otras áreas que requieran una protección superficial del suelo antes de que éste presente una cobertura vegetal eficaz y permanente. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s) 2,9 – 3,8
(Aquanea, 2014).

Cortantes de flujo (N/m²) 96 – 191
(Aquanea, 2014).

Pendiente (°) 45
(Aquanea, 2014).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Protección de taludes. Creación de drenajes y canales temporales vegetados. Sustitución de muros, gaviones de escolleras para garantizar protección, reducir costes de obra y posibilitar la colonización vegetal. (Magdaleno, 2011).



30. Geomalla permanente (suelo vegetado).

Técnica Geomalla permanente (suelo vegetado)

Características Técnicas

Consisten en unas matrices orgánicas o sintéticas estructuradas en mallas de polipropileno para la protección del suelo en taludes, márgenes fluviales u otras áreas que requieran una protección superficial del suelo antes de que éste presente una cobertura vegetal eficaz y permanente. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s) 4,6 – 6,7
(Aquanea, 2014).

Cortantes de flujo (N/m²) 380 – 670
(Aquanea, 2014).

Pendiente (°) 45
(Aquanea, 2014).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Protección de taludes. Creación de drenajes y canales temporales vegetados. Sustitución de muros, gaviones de escolleras para garantizar protección, reducir costes de obra y posibilitar la colonización vegetal. (Magdaleno, 2011).



31. Malla de yute.

Técnica Malla de yute

Características Técnicas

Malla de fibra de Yute biodegradable 100% para la protección del suelo ante la erosión.

Velocidades del flujo (m/s)

0,3 – 0,8
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Cortantes de flujo (N/m²)

22
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Pendiente (°)

45
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Soporte de hidrosiembra, protección ante los procesos erosivos en taludes y márgenes, consolidación de los taludes con pendiente y restauración de la vegetación. (Bruc Jardí, 2015).



Alibaba.com
Global Trade Starts Here™

32. Malla de paja.

Técnica Malla de paja

Características Técnicas

Malla orgánica de paja 100% y biodegradable.

Velocidades del flujo (m/s)

0,3 – 0,09
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Cortantes de flujo (N/m²)

80
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Pendiente (°)

45
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Soporte de hidrosiembra, protección ante los procesos erosivos en taludes y márgenes, consolidación de los taludes con pendiente y restauración de la vegetación. (Bruc Jardí, 2015).



Bon Terra
Iberica

33. Malla con fibra de coco.

Técnica Malla con fibra de coco

Características Técnicas

Malla orgánica de fibras de coco (100%) y biodegradable. De coloración marrón. La degradación depende de las condiciones climatológicas (lluvias, humedad, etc.). (TIROGAVERD, 2015).

Velocidades del flujo (m/s)

0,9 – 1,2
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Cortantes de flujo (N/m²)

110
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Pendiente (°)

45
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Evitar la erosión de los taludes y para recubrir alrededor de los estanques. (TIROGAVERD, 2015).



mediodes
consultoría ambiental y paisajismo

34. Fibra de vidrio.

Técnica Fibra de vidrio

Características Técnicas

La Fibra de vidrio, manta de vidrio o mat, son unos filamentos de vidrio unidos entre sí por una emulsión y conformados en forma de manta o tela.

Velocidades del flujo (m/s)

0,8 – 2,1
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Cortantes de flujo (N/m²)

96
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación



Nautic
EXPO

35. Rollo de fibra de coco.

Técnica Rollo de fibra de coco

Características Técnicas

Consiste en un cilindro de 30 centímetros de diámetro de fibra de coco prensada sujeta por una malla generalmente no biodegradable. Para acelerar el proceso, generalmente se pre-vegeta en vivero.

Velocidades del flujo (m/s)

2,9
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Cortantes de flujo (N/m²)

240
(Apuntes HF, UPM, 2013).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Para refuerzo del pie de las orillas.



mediodes
consultoría ambiental y paisajismo

36. Geotextil con estaquillas vivas.

Técnica Geotextil con estaquillas vivas

Características Técnicas

Material sintético plano formado por fibras poliméricas (polipropileno, poliéster o poliamidas), similar a una tela y de gran deformabilidad. Los geotextiles como su nombre indica, se asemejan a textiles, telas, que se pueden enrollar, cortar, coser, etc. (Durotex Geotextiles, 2015). Se añaden estaquillas vivas para mejorar la sujeción.

Velocidades del flujo (m/s)

1 – 3
(Paulo & Medes, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 – 200
(Paulo & Medes, 2011).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Varias funciones simultáneas: filtración, separación, refuerzo, protección, drenaje...



Archi

37. Geoceldas.

Técnica Geoceldas

Características Técnicas

Manta tridimensional celular que ejerce una alta protección antierosiva. Se trata de una manta de material textil o plástico tridimensional dispuesto en forma de alvéolos (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 - 150

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

45

(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Su principal función es la estabilización de la primera capa del suelo. Ayuda al drenaje de las aguas de escorrentía. Protección de taludes y riberas, y la realización de merlones. (Magdaleno, 2011).



38. Rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™.

Técnica Rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™

Características Técnicas

Consiste en un cilindro de 30 centímetros de diámetro de fibra de coco prensada sujeta por una malla generalmente no biodegradable. Para acelerar el proceso, generalmente se pre-vegetan en vivero. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3

(Magdaleno, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Revegetación y consolidación de márgenes fluviales. Delimitación de márgenes de lagunas en parques urbanos. Protección de los márgenes afectados por la erosión de las olas producidas por embarcaciones y actividades recreativas en canales, ríos y embalses. (Magdaleno, 2011).



39. Gavión flexible tipo Rock Roll™ y rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™.

Técnica Gavión flexible tipo Rock Roll™ y rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™

Características Técnicas

Estructura mixta de gavión flexible (Rock Roll™) anclado a la parte inferior y un rollo estructurado en fibra vegetado (Fiber Roll™). La combinación de estos materiales entre sí aumenta el peso específico de la estructura, aumentando la resistencia a la tracción. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3

(Magdaleno, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Consolidación de las márgenes de los cursos fluviales con procesos graves de erosión local y/o elevada velocidad del flujo de agua. Protección de las márgenes afectadas por los procesos de erosión local en régimen regular y en períodos de aumento de caudal. (Magdaleno, 2011).



mediodes
gestión ambiental y protección

40. Geomalla con gavión flexible tipo Rock Roll™ y rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™.

Técnica Geomalla con gavión flexible tipo Rock Roll™ y rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™

Características Técnicas

Se trata de una forma de canalización en verde, consistente en un sistema combinado e integrado por estructura de gavión flexible (Rock Roll™), un rollo estructurado en fibra vegetado (Fiber Roll™) y una geomalla permanente, que será posteriormente hidrosebrada. La geomalla ofrece la protección del talud frente a fenómenos de avenida. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

6

(Magdaleno, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

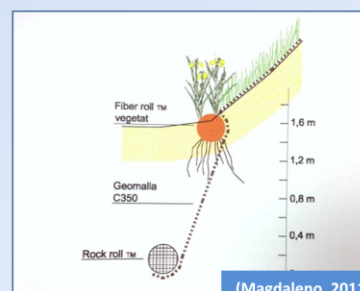
80

(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Protección de márgenes fluviales afectados por procesos de erosión local en períodos de aumento de caudal, preferiblemente en medio mediterráneo, debido a su régimen torrencial. Sustitución de gaviones, escolleras y diques asumiendo un coste global económicamente más favorable. (Magdaleno, 2011).



(Magdaleno, 2011)

41. Enfajinado de rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™.

Técnica

Enfajinado de rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™

Características Técnicas

Estructura mixta de rollos estructurados en fibra colocados de forma escalonada en taludes de márgenes de cursos de agua e intercalados con arbustos en maceta, que aumenten la consolidación entre los rollos de fibra y la cohesión del suelo, con un sistema de raíces biotécnicamente idóneo. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

>2,5
(Magdaleno, 2011).

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

45 – 60
(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Consolidación del lecho ordinario de los cursos fluviales. Protección de taludes afectados por la erosión lateral del agua en subidas del caudal. Restauración de la cubierta vegetal de taludes con pendientes elevadas. Restauración de taludes con mínima o nula cohesión del sustrato. Restauración del lecho de cauces con erosión localizada. Restauración de taludes en clima mediterráneo. (Magdaleno, 2011).



naturalea

42. Deflector estructurado con rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™.

Técnica

Deflector estructurado con rollo estructurado en fibra vegetado tipo Fiber Roll™

Características Técnicas

Unidad mínima de 3 m de longitud, 1,2 de anchura y 0,5 de alzada, formada por un enfajinado de cuatro Fiber Roll™ colocados dos a dos en paralelo, y separados por 0,6m, con aportación de gravas en el medio y plantación de arbustos en la estructura. Para la ubicación es necesaria una validación previa de ingeniería hidráulica ya que los efectos de la estructura en la dinámica fluvial pueden ser significativos. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

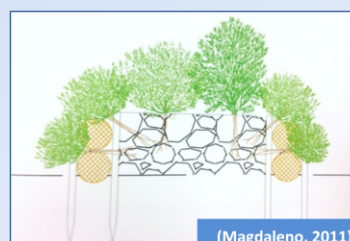
Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Consolidación de las márgenes del lecho. Desvíos del canal de aguas bajas. Aumento de la diversidad morfológica del cauce. Consolidación de la vegetación propia de ribera. Protección de la base de taludes fluviales con procesos de erosión local. Potenciación de procesos de meandrificación. (Magdaleno, 2011).



(Magdaleno, 2011)

43. Biorrollos.

Técnica

Biorrollos

Características Técnicas

Se trata de estructuras cilíndrica tipo biorrollo de baja densidad y compuesto por fibras de diversos tipos: paja, coco, *miscanthus*, etc., generalmente estructuradas en fibras degradables como red de coco y destinadas a retener la erosión. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 – 6

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

100 – 200

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

80

(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Prevención de erosión en laderas afectadas por incendios, obras, etc. y zonas con grandes problemas de erosión superficial. (Magdaleno, 2011).



Técnicas de ingeniería estructural vegetal

44. Muros verdes Deltalok.

Técnica Muros verdes Deltalok

Características Técnicas

Es un sistema de construcción de muros verdes mediante la utilización de sacos colocados a tresbolillo y comunicados con un conector. El saco es de un material vegetal que no tiene incidencia negativa en el medio ambiente. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

3 - >6

(Magdaleno, 2011) & (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

80

(Magdaleno, 2011).

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa

Ámbito de aplicación

Creación de muros atractivos de tierra con vegetación, para toda una variedad de propósitos que incluyen: muros ambientalmente integrados, control de la erosión, pendientes de retención de la vegetación, estabilización de orillas de corrientes y muros de contención. Muy usada como revestimiento de taludes verticales inestables. (Magdaleno, 2011).



45. Tierra armada.

Técnica Tierra armada

Características Técnicas

Las tierras reforzadas son muros de gravedad para estabilización de taludes y riberas inestable y para la propia construcción de muros. Este tipo de obras tienen la virtud de ser deformables y suficientemente permeables. Estos tipos de muros pueden describirse como rellenos de tierra que terminen con una cobertura vegetal. Están compuestos por diversas partes, armados y unidos con un geotextil o malla, con el que se aumenta la resistencia del conjunto. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

60 - 70

(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Época de Implantación

En cualquier momento.
Durante la parada vegetativa si se añaden plantas leñosas

Ámbito de aplicación

Las tierras reforzadas, además de ser utilizadas para la estabilización de deslizamientos superficiales, se pueden utilizar también para la construcción de terraplenes revegetados para taludes de carreteras, autopistas y vías férreas, estribos de puentes, barrera de protección para caída de piedras, terraplenes con fuerte pendiente para barreras anti-ruido. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).



46. Gavión cilíndrico o Rock Roll.

Técnica

Gavión cilíndrico o Rock Roll

Características Técnicas

Gavión estructurado en una red de polipropileno de alta densidad y relleno de grava. Es una estructura pensada para ofrecer una alta resistencia con una mayor integración biológica que los gaviones convencionales. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

4 - >6

(Magdaleno, 2011) & (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

En cualquier momento.
Durante la parada vegetativa
si se añaden plantas leñosas

Ámbito de aplicación

Protección de márgenes que están o pueden estar afectadas por la presión del agua. Protección de las márgenes afectados por gran oleaje o fuertes corrientes acuáticas. Como protección a la erosión en zonas afectadas por el desguace de redes de lluvia o afluentes de estaciones depuradoras. Como revestimiento de escolleras y gaviones. (Magdaleno, 2011).



aquanea

47. Gavión flexible laminar, vegetative revetment o Rock Roll.

Técnica

Gavión flexible laminar, vegetative revetment o Rock Roll

Características Técnicas

Estructura de gavión laminar con componentes internos adicionales que sostienen una comunidad vegetal madura previamente a la instalación. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

5 - >6

(Magdaleno, 2011) & (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

Durante la parada vegetativa.

Ámbito de aplicación


Estabilización y protección de las márgenes del río, canales, embalses, etc., afectados por una fuerte erosión hídrica. Restauración de la cubierta vegetal en ríos, canales, torrentes, lagos, embalses... Mejora y creación de microhábitats fluviales para invertebrados acuáticos y zonas de freza para peces. (Magdaleno, 2011).



aquanea

48. Gavión.


Técnica	Gavión
Características Técnicas <p>Cajones normalmente paralelepípedos de alambre galvanizado, con un recubrimiento opcional de PVC para su mayor protección. Rellenados con piedras, afianzan las orillas longitudinalmente y son capaces de resistir su gravedad. Se utilizan cuando la corriente del agua es muy fuerte y las piedras solas no ofrecen una protección suficiente. Son flexibles y permeables. (Magdaleno, 2011).</p>	
Velocidades del flujo (m/s)	5 - >6 (Magdaleno, 2011) & (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).
Cortantes de flujo (N/m²)	200 – 480 (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010) & (Apuntes HF, UPM, 2013).
Pendiente (º)	Todo tipo (Magdaleno, 2011).
Época de Implantación	
Ámbito de aplicación	<p>Encauzamientos de ríos. Protección y defensa de márgenes, incluida su integración medioambiental. Adecuado para fuertes pendientes y cuando se requieren estructuras moderadas de soporte contra la erosión. Construcción de diques de regularización y corrección de torrentes. Construcción de puentes y pasarelas provisionales. (Magdaleno, 2011).</p>



CONCEPTODEFINICION.DE

49. Gavión de recubrimiento.

Técnica	Gavión de recubrimiento
Características Técnicas <p>Estructura metálica paralelepípeda de gran superficie y poco espesor y de longitud variables, elaborada con enrejado metálico de mallas hexagonales, tejido con alambre de acero suave galvanizado reforzado y, opcionalmente plastificado con PVC. Está dividida en diferentes celdas con una malla perpendicular a la base. Es una defensa flexible que se adapta a los posibles movimientos y asentamientos. (Magdaleno, 2011).</p>	
Velocidades del flujo (m/s)	5 (Magdaleno, 2011).
Cortantes de flujo (N/m²)	>200 (Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).
Pendiente (º)	40 (Magdaleno, 2011).
Época de Implantación	
Ámbito de aplicación	<p>Recubrimiento de taludes en ríos y canales. Acequias y desagües consiguiéndose encauzamientos y canalizaciones de óptimo rendimiento. Protección de estribos de puentes plataformas de cimentación. Revestimiento de piedra seca. Protección de zonas con socavaciones. (Magdaleno, 2011).</p>



GALBIS

50. Gavión con estacas vivas.

Técnica

Gavión con estacas vivas

Características Técnicas

Cajones normalmente paralelepípedos de alambre galvanizado, con un recubrimiento opcional de PVC para su mayor protección. Rellenados con piedras, afianzan las orillas longitudinalmente y son capaces de resistir su gravedad. Se utilizan cuando la corriente del agua es muy fuerte y las piedras solas no ofrecen una protección suficiente. Son flexibles y permeables. Se combina con estacas vivas. (Magdaleno, 2011).

Velocidades del flujo (m/s)

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

480

(Greening, 2010).

45

(Greening, 2010).



Archi
EXPA

51. Escollera.

Técnica

Escollera

Características Técnicas

Obra de defensa longitudinal en riberas fluviales realizada con gruesos bloques de piedra y dispuesta de forma casi paralela a la corriente. (Palmeri, Silván, & Prieto, 2002).

Velocidades del flujo (m/s)

Cortantes de flujo (N/m²)

Pendiente (°)

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

1,5 – 5,5

(Apuntes HF, UPM, 2013).

120 – 480

(Apuntes HF, UPM, 2013).

26,56 – 45,5

(Apuntes HF, UPM, 2013).



SAN PEDRO
EL CERRO
Somos fabricantes, somos de confianza

52. Escollera revegetada.

Técnica Escollera revegetada

Características Técnicas

Obra de defensa longitudinal en riberas fluviales realizada con gruesos bloques de piedra y dispuesta de forma casi paralela a la corriente. En los espacios entre los bloques de piedra se insertan estacas vivas o ramas vivas de sauce o de otras especies dotadas de análoga capacidad vegetativa que, cuando enraizan, permiten una estabilización suplementaria. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Velocidades del flujo (m/s)

>6
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

> 200
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

26,56 - 45,5
(Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa

Ámbito de aplicación

Se utiliza en torrentes y ríos, en cursos de agua con fuerte transporte sólido y alta velocidad de corriente: para protección de las riberas de la erosión de la corriente, para ensanchamiento de la sección hidráulica, para reducir el riesgo de desbordamiento y para el refuerzo del pie de taludes reperfilados. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).



53. Rampa de piedras.

Técnica Rampa de piedras

Características Técnicas

Estabilización del fondo del cauce de un río con piedras de notable dimensión en sustitución de un azud en la zona del salto. Esta estructura resulta más funcional para los movimientos piscícolas. Puede ser también realizada lateralmente en un azud como paso o escala de peces. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).

Velocidades del flujo (m/s)

>6
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200
(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

En el periodo de parada vegetativa

Ámbito de aplicación

Ríos con débil pendiente longitudinal y fondo de gravas o arena. En la base o lados de azudes. (Palmeri, Silván & Prieto, 2002).



54. Muro celular de hormigón revegetado.

Técnica

Muro celular de hormigón revegetado

Características Técnicas

El hormigón celular es un material de construcción, destinado a la obra gruesa. Producido exclusivamente a partir de materias primas naturales, se compone de agua, arena, cemento y aire. Se puede o no revegetar.

Velocidades del flujo (m/s)

>6

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Cortantes de flujo (N/m²)

>200

(Fundació de l'Enginyeria Agrícola Catalana, 2010).

Pendiente (°)

Época de Implantación

En cualquier momento. Durante la parada vegetativa si se añaden plantas leñosas

Ámbito de aplicación



55. Muros de contención.

Técnica

Muros de contención

Características Técnicas

Los Muros de Contención son elementos constructivos que cumplen la función de cerramiento, soportando por lo general los esfuerzos horizontales producidos por el empuje de tierras. (Construmatica, 2015).

Velocidades del flujo (m/s)

Cortantes de flujo (N/m²)

239,4

(Greening, 2010).

Pendiente (°)

45

(Greening, 2010).

Época de Implantación

Ámbito de aplicación

Soporte del empuje de tierras, generalmente en desmontes o terraplenes, evitando el desmoronamiento y sosteniendo el talud. Contención de líquidos. (Construmatica, 2015).





Anexo II: Especies vegetales recomendadas según la región ecológica

Anexo II

Especies vegetales recomendadas según la región ecológica

Galicia:	<i>Salix atrocinerea, Alnus glutinosa, Corylus avellana, Fraxinus excelsior o Fraxinus angustifolia</i>
Cornisa Cantábrica:	<i>Salix atrocinerea, Alnus glutinosa, Corylus avellana, Fraxinus excelsior, Salix eleagnos y Salix purpurea</i>
Vertiente meridional cantábrica:	<i>Salix cantabrica, Salix atrocinerea, Salix salviifolia, Salix eleagnos, Salix purpurea, Betula alba y Ulmus minor.</i>
Pirineo y Prepirineo:	<i>Salix atrocinerea, Salix eleagnos, Salix purpurea (Corylus avellana, Fraxinus excelsior, Betula alba, Salix daphnoides, Fraxinus angustifolia, Alnus glutinosa, Populus alba, Populus nigra y Ulmus minor).</i>
Cataluña oriental:	<i>Salix atrocinerea, Salix eleagnos, Salix purpurea, Salix alba, Salix fragilis, Corylus avellana, Fraxinus excelsior, Fraxinus angustifolia, Alnus glutinosa, Vitex agnus-castus, Populus alba, Populus nigra y Ulmus minor.</i>
Depresión del Ebro:	<i>Salix purpurea, Salix triandra, Tamarix gallica, Tamarix canariensis, Tamarix africana, Populus alba, Populus nigra, Salix alba, Salix fragilis y Ulmus minor.</i>
Sistema Ibérico Norte:	<i>Salix atrocinerea, Salix eleagnos, Salix purpurea, Salix salviifolia, Corylus avellana, Fraxinus excelsior, Fraxinus angustifolia, Populus nigra y Alnus glutinosa.</i>
Submeseta norte:	<i>Salix eleagnos, Salix salviifolia, Salix atrocinerea, Salix purpurea, Salix alba, Salix fragilis, Fraxinus angustifolia, Alnus glutinosa, Populus alba, Populus nigra y Ulmus minor.</i>
Sierras hercínicas:	<i>Salix atrocinerea, Salix salviifolia, Fraxinus angustifolia, Alnus glutinosa y Prunus lusitanica.</i>
Sistema ibérico sur:	<i>Salix purpurea, Salix eleagnos, Salix atrocinerea, Fraxinus angustifolia, Ulmus minor, Salix alba, Populus alba, Populus nigra, taray.</i>
Tajo medio:	<i>Salix salviifolia, Salix alba, Salix fragilis, Salix purpurea, Tamarix canariensis, Tamarix africana, Fraxinus angustifolia, Populus alba, Populus nigra y Ulmus minor.</i>
Levante:	<i>Salix eleagnos, Salix atrocinerea, Fraxinus angustifolia, Populus alba, Tamarix canariensis, Nerium oleander.</i>
Baleares:	<i>Tamarix canariensis, Vitex agnus-cactus y Fraxinus angustifolia.</i>
Extremadura y maríanicas:	<i>Flueggea tinctorea, Nerium oleander, Fraxinus angustifolia, Salix salviifolia, Populus alba, Populus nigra, Ulmus minor, (Zonas de montaña: Prunus lusitanica, Salix atrocinerea, Alnus glutinosa).</i>
La Mancha:	<i>Salix purpurea, Tamarix canariensis, Populus alba, Ulmus minor (Fraxinus angustifolia y Salix atrocinerea).</i>
Tinto-Odiel:	<i>Nerium oleander, Flueggea tinctorea y Fraxinus angustifolia.</i>
Litoral atlántico:	<i>Salix atrocinerea, Fraxinus angustifolia y Frangula alnus.</i>
Depresión del Guadalquivir:	<i>Tamarix canariensis, Salix purpurea, Salix alba, Populus alba, Fraxinus angustifolia, Ulmus minor y Nerium oleander.</i>
Béticas:	<i>Salix purpurea, Salix atrocinerea, Salix eleagnos y Fraxinus angustifolia. (Zonas bajas más cálidas: Tamarix canariensis, Tamarix africana, Salix alba, Populus alba y Nerium oleander).</i>
Sureste:	<i>Tamarix canariensis, Tamarix africana, Nerium oleander, Populus alba, Ulmus minor, Salix alba y Fraxinus angustifolia.</i>
Aljibe:	<i>Nerium oleander, Salix pedicellata, Fraxinus angustifolia. (Zonas frescas: Salix atrocinerea, y Alnus glutinosa).</i>
Penibéticas:	<i>Nerium oleander, Salix pedicellata, Fraxinus angustifolia, Salix atrocinerea, Salix eleagnos. (Zonas bajas: Tamarix canariensis, Tamarix africana, Salix alba y Populus alba).</i>
Sierra Nevada:	<i>Salix atrocinerea, Salix eleagnos, Salix purpurea, Fraxinus angustifolia y Alnus glutinosa.</i>
Canarias occidentales:	<i>Salix canariensis, Erica arborea y Tamarix canariensis.</i>
Canarias orientales:	<i>Tamarix canariensis</i>

Magdaleno Mas, F., 2011. *Manual de técnicas de restauración fluvial*. CEDEX: Sección de Edición.



Anexo III: Programación de la macro de consulta para la aplicación informática

Anexo III

Programación de la macro de consulta para la aplicación informática



```
Sub Macro1()  
,  
' Macro1 Macro  
,  
' Acceso directo: CTRL+m  
,  
  
Sheets("RESULTADOS").Select  
Cells.Select  
Selection.ClearContents  
With Selection.Interior  
    .Pattern = xlNone  
    .TintAndShade = 0  
    .PatternTintAndShade = 0  
End With  
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone  
Sheets("BD").Select  
Columns("C:E").Select  
Selection.AutoFilter  
ActiveSheet.Range("$C$1:$E$101").AutoFilter Field:=1, Criteria1:= _  
    ">=OUTPUT!D9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""  
ActiveSheet.Range("$C$1:$E$101").AutoFilter Field:=2, Criteria1:= _  
    ">=OUTPUT!D9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""  
ActiveSheet.Range("$C$1:$E$101").AutoFilter Field:=3, Criteria1:= _  
    ">=OUTPUT!D9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""  
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-6  
Range("N2:O100").Select  
Selection.Copy  
Sheets("RESULTADOS").Select  
Range("A2").Select  
ActiveSheet.Paste  
Sheets("BD").Select  
Application.CutCopyMode = False  
Selection.AutoFilter  
Columns("F:H").Select  
Selection.AutoFilter  
ActiveSheet.Range("$F$1:$H$101").AutoFilter Field:=1, Criteria1:= _
```




```
">=OUTPUT!I9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""
ActiveSheet.Range("$F$1:$H$101").AutoFilter Field:=2, Criteria1:= _
">=OUTPUT!I9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""
ActiveSheet.Range("$F$1:$H$101").AutoFilter Field:=3, Criteria1:= _
">=OUTPUT!I9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""
Range("N2:O100").Select
Selection.Copy
Sheets("RESULTADOS").Select
Range("C2").Select
ActiveSheet.Paste
ActiveWindow.SmallScroll Down:=75
Sheets("BD").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.AutoFilter
Columns("I:J").Select
Selection.AutoFilter
ActiveSheet.Range("$I$1:$J$101").AutoFilter Field:=1, Criteria1:= _
">=OUTPUT!N9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""
ActiveSheet.Range("$I$1:$J$101").AutoFilter Field:=2, Criteria1:= _
">=OUTPUT!N9", Operator:=xlOr, Criteria2:=""
Range("E2").Select
Range("N2:O100").Select
Selection.Copy
Sheets("RESULTADOS").Select
Range("E2").Select
ActiveSheet.Paste
Columns("A:F").Select
Selection.ColumnWidth = 50
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-12
Range("A1").Select
Sheets("BD").Select
Selection.AutoFilter
Sheets("RESULTADOS").Select
Range("A1").Select
```

End Sub

,

